

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Cabos de Alta Temperatura em Linhas Aéreas AT  
Condições de falha térmica/mecânica**

**José Pedro Carvalho Magalhães**

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

Junho de 2013







# Resumo

Condutores elétricos não são propriamente uma novidade. Desde que a energia elétrica é utilizada pelo Homem que servem como vias para a energia circular desde os centros de produção até aos pontos de consumo. Mas como tudo neste mundo nada é imutável também os condutores elétricos evoluíram ao longo dos anos. O mais recente elo na cadeia evolutiva dos condutores elétricos é o cabo ACCC (*Aluminum Conductor Composite Core*).

Na presente dissertação o cabo ACCC é alvo de estudo e o que se pretende com este trabalho é analisar as características tecnológicas desta alternativa recente no mercado dos condutores elétricos, em particular dos cabos de alta temperatura, classificação na qual se enquadra.

Primeiramente estuda-se a estrutura do cabo, o seu núcleo formado pelo compósito de fibra de carbono e fibra de vidro e o condutor constituído por alumínio, e as suas propriedades. A apresentação do cabo ACCC é realizada comparando-o, em simultâneo, com o cabo convencional ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*), que equipa incontáveis linhas de transporte e distribuição de energia em todo o mundo. Esta abordagem foi adotada de forma a tornar mais claras as inovações e mais-valias que o cabo ACCC traz consigo.

Seguidamente são explanadas as vantagens e desvantagens inerentes ao cabo ACCC e discutidas as aplicações possíveis numa rede de transporte de energia elétrica.

Os comportamentos térmico e mecânico do cabo são abordados, com especial relevância para o comportamento térmico, devido ao facto de o alumínio, quando o cabo estiver a funcionar a temperaturas muito elevadas, deixa de contribuir para suportar a carga mecânica e para o aumento da flecha provocada por este. Este comportamento origina um ponto de Joelho que faz com que a variação da flecha com a temperatura se torne não linear. Significa também que o cabo terá valores diferentes para o módulo de *Young* e coeficiente de dilatação térmica, dependendo de qual região pertence a temperatura em questão, pré ponto de Joelho ou pós ponto de Joelho. A existência do ponto de Joelho levanta problemas ao nível do cálculo da flecha dos condutores. Esta situação é estudada e é sugerida uma abordagem para obter os valores das flechas lidando com o comportamento descontínuo que o cabo apresenta. Estes valores são comparados com os valores fornecidos pelo fabricante e com

valores reais fruto de medições efetuadas numa das linhas equipadas com este condutor existente em Portugal. Também foram comparados os valores das flechas criadas pelos cabos ACCC com cabos convencionais ACSR, em iguais circunstâncias, onde foi possível constatar que o cabo ACCC permite uma diminuição significativa da dimensão das flechas.

**Palavras-Chave:** Cabo ACCC, cabos convencionais, compósito fibra carbono/fibra de vidro, alumínio, equação dos estados, flecha, ponto de joelho

# Abstract

*Electrical conductors are not exactly a novelty. Since electricity is used by humans that are used as pathways for energy flow from the production centers to consumption points. But like everything else in this world nothing is immutable and also electrical conductors have evolved over the years. The latest link in the evolutionary chain of electrical conductors is the ACCC (Aluminum Conductor Composite Core) conductor.*

*In this dissertation the ACCC conductor is target of study and the aim of this study is to find out more about this news in the world of electrical conductors, in particular the high temperature low sag conductors, in which classification fits.*

*First of all the structure and proprieties of the conductor are studied, its core formed by the carbon/glass composite material and the conductor material consisting of aluminum. Simultaneously, the ACCC conductor is compared with the conventional ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) conductor, which equips endless power transmission lines throughout the world. This approach was chosen to better understand the innovations and gains the ACCC conductor brings.*

*Then, it is explained the advantages and disadvantages inherent to the ACCC conductor and discussed possible applications in transmission lines.*

*The thermal and mechanical behavior of the conductor cable are discussed, with special relevance for the thermal behavior due to the fact that aluminum, when the conductor is operating at very high temperatures, stop contributing to withstand the mechanical load and the increase of the sag. This behavior leads to the existence of a knee-point which causes the thermal sag variation to become non-linear. It also means that the conductor will have different values for the Young's modulus and coefficient of thermal expansion, depending on which region belongs to the temperature in question, before or after the knee-point. The existence of the knee-point raises problems in the calculation of the conductors sag. This situation is studied and an approach is suggested to obtain the sag values dealing with discontinuous behavior that conductor offer. These values are compared with the values provided by the manufacturer and with actual result of measurements made on the lines equipped with this conductor in Portugal. Also compared the values of the sag created by the*

*ACCC conductors with conventional ACSR conductors, in equal conditions, where it was concluded that the ACCC conductor allows a significant decrease in the size of the sag.*

**Keywords:** *ACCC conductor, conventional conductors, carbon/glass composite material, aluminum, knee-point, thermal sag*



# Agradecimentos

A elaboração desta dissertação não teria sido possível sem a colaboração de várias pessoas. Não poderia deixar de demonstrar o meu apreço e agradecimento para as mesmas.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador e supervisor nesta dissertação, o Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura. Obrigado por toda a disponibilidade, conselhos, orientações e motivação que forneceu durante este período. Agradeço, também, pelo contributo que deu durante toda a minha formação académica, onde através do seu profissionalismo, conduta, conhecimentos e experiência se tornou, para mim, um modelo a seguir.

Ao Senhor Engenheiro Ricardo Pina, da EDP Distribuição, agradeço a disponibilidade, os dados fornecidos, os conselhos e orientações. Disponibilizou o seu tempo, sem que nada o obrigasse a tal, para me auxiliar no desenvolvimento desta dissertação, sem ele a realização deste trabalho não teria sido possível.

Aos meus amigos, que não só no desenvolvimento desta dissertação, mas também durante todo o percurso académico estiveram presentes nos bons e maus momentos sempre com palavras de consolo e motivação ou de júbilo e celebração e sem os quais superar certos obstáculos teria sido imensamente mais difícil, se não mesmo impossível. Sem desconsideração para com os outros tenho de particularizar Fábio Branco; um verdadeiro irmão de armas, ultrapassamos muitos obstáculos juntos e que com o seu dom de com um simples comentário ou sugestão desbloquear um problema que, por vezes, já se arrastava à tempo de mais ajudou-me de mais maneiras do que ele imagina.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à minha família sem quem eu não seria ninguém. Quaisquer palavras que diga serão escassas para descrever a sua importância. Por tudo dedico-lhes este trabalho, como forma de agradecimento.



# Índice

<b>Capítulo 1</b>	<b>1</b>
Introdução	1
1.1. Motivação e Objetivos	3
1.2. Estrutura da Dissertação	4
<b>Capítulo 2</b>	<b>5</b>
Descrição do Cabo ACCC	5
2.1. O Núcleo	6
2.2. O Condutor	8
<b>Capítulo 3</b>	<b>11</b>
Vantagens e Desvantagens	11
3.1. Vantagens	11
3.1.1. Dimensão da flecha	11
3.1.2. Ausência de deformação temporal	12
3.1.3. Menor corrosão	12
3.1.4. Maior capacidade de transporte e menores perdas	12
3.1.5. Poupança nos apoios	13
3.2. Desvantagens	13
3.2.1. Preço	13
3.2.2. Limitações impostas por outros equipamentos	13
3.2.3. Acessórios e instalação	14
3.2.4. Funcionamento a altas temperaturas	14
3.2.5. Comportamento descontínuo	14
<b>Capítulo 4</b>	<b>15</b>
Aplicações	15
4.1. Construção de uma nova linha	15
4.2. <i>Up-rating</i> de uma linha existente	16
4.3. Casos Especiais	17
4.3.1. Interligações entre áreas de controlo	18
4.3.2. Travessias de obstáculos	18

4.3.3. Zonas de desgaste rápido .....	18
4.3.4. Zonas protegidas .....	18
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>21</b>
<b>Comportamento Mecânico .....</b>	<b>21</b>
5.1. Relação Solicitação-Deformação .....	21
5.2. Elasticidade e dilatação do material .....	22
5.3. Vibração eólica .....	23
5.4. Gelo .....	27
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>29</b>
<b>Comportamento Térmico .....</b>	<b>29</b>
6.1. Método de cálculo .....	31
6.1.1. Tração máxima .....	31
6.1.2. Coeficientes de sobrecarga .....	31
6.1.2.1. Força do vento .....	32
6.1.2.2. Ação do gelo .....	33
6.1.2.3. Cálculo dos coeficientes de sobrecarga.....	35
6.1.3. Determinação do vão crítico .....	35
6.1.4. Determinação do estado mais desfavorável .....	36
6.1.5. Equação dos estados .....	36
6.1.6. Cálculo da flecha .....	37
6.2. Caso de estudo 1 - Alfena .....	38
6.2.1. Abordagem .....	38
6.2.2. Dados do problema .....	40
6.2.3. Resultados.....	41
6.2.3.1. Tração máxima.....	41
6.2.3.2. Força do vento .....	41
6.2.3.3. Coeficientes de sobrecarga.....	42
6.2.3.4. Vão Crítico.....	42
6.2.3.5. Estado mais desfavorável.....	43
6.2.3.6. Flechas .....	43
6.3. Caso de estudo 2 - Figueira da Foz.....	48
6.3.1. Abordagem .....	49
6.3.2. Dados do problema .....	49
6.3.3. Resolução.....	50
6.3.3.1. Tração máxima.....	50
6.3.3.2. Força do vento .....	50
6.3.3.3. Coeficientes de sobrecarga.....	50
6.3.3.4. Vão Crítico.....	51
6.3.3.5. Estado mais desfavorável.....	51
6.3.3.6. Flechas .....	51

<b>Capítulo 7.....</b>	<b>53</b>
<b>Conclusão e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>53</b>
7.1    Conclusões.....	53
7.2    Trabalhos Futuros .....	55
<b>Referências .....</b>	<b>57</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>61</b>
Anexo 1: Características dos cabos .....	61
A1.1. Cabo ACSR - Alfena.....	61
A1.2. Cabo ACCC - Alfena .....	62
A1.3. Cabo ACCC - Figueira da Foz .....	63
Anexo 2: Resultados do fabricante .....	64
A2.1. Cabo ACSR - Alfena.....	64
A2.2. Cabo ACCC - Alfena .....	65
Anexo 3: Resultados EDP .....	66
A3.1. Cabo ACSR - Alfena.....	66
Anexo 4: Resultados obtidos .....	67
A4.1. Cabo ACSR - Alfena.....	67
A4.2. Cabo ACCC - Alfena .....	68
A4.2. Cabo ACCC - Figueira da Foz .....	71



## Lista de figuras

Figura 2.1 - Comparação entre o cabo ACCC e o cabo ACSR. ....	5
Figura 2.2 - Núcleo compósito co cabo ACCC. No centro as fibras de carbono revestidas pelas fibras de vidro. ....	6
Figura 3.1 - Comparação da dimensão da flecha (adaptado de [15]). ....	12
Figura 5.1 - Efeito da vibração eólica num cabo. ....	23
Figura 5.2 - Vibração induzida pelo vento. ....	24
Figura 5.3 - Espaçador-amortecedor para linhas aéreas. ....	24
Figura 5.4 - Dano por abrasão num espaçador. ....	25
Figura 5.5 - Fadiga de fios condutores. ....	25
Figura 5.6 - Pinças de suspensão ASG. ....	26
Figura 6.1 - Comportamento da flecha dos cabos face ao aumento da temperatura. ....	30
Figura 6.2 - Força do vento numa direção horizontal ao condutor. ....	32
Figura 6.3 - Corte transversal da configuração mais provável do gelo no condutor. ....	34
Figura 6.4 - Configuração assumida para a deposição da manga de gelo no condutor. ....	34
Figura 6.5 - Secção vista pelo vento quando a manga de gelo está depositada no condutor. .	34
Figura 6.6 - Diagrama de Verificação do Estado Mais Desfavorável. ....	36
Figura 6.7 - Flecha criada pelo cabo ACCC considerando diferentes temperaturas para o ponto de joelho. ....	44
Figura 6.8 - Valores das flechas obtidos, para o cabo ACCC, comparativamente aos resultados fornecidos pelo fabricante. ....	45
Figura 6.9 - Valores das flechas obtidos, para o cabo ACSR, comparativamente aos resultados fornecidos pelo fabricante e pela EDP. ....	46
Figura 6.10 - Comparação entre as flechas dos cabos ACSR e ACCC. ....	47

Figura 6.11 - Cabo ACCC instalado na Figueira da Foz (olhando atentamente, está em frente à ponte) .....	48
--	----



## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades do núcleo utilizado nos cabos ACCC e ACSR [22].....	7
Tabela 2.2 - Propriedades do alumínio utilizado nos cabos ACCC e ACSR [22]. ....	8
Tabela 6.1 - Valores da pressão dinâmica do vento. ....	33
Tabela 6.2 - Valores para o coeficiente de forma. ....	33
Tabela 6.3 - Valores para o coeficiente de redução. ....	33
Tabela 6.4 - Características do cabo ACSR utilizado. ....	40
Tabela 6.5 - Características do cabo ACCC utilizado. ....	40
Tabela 6.6 - Valores obtidos para a tração máxima admissível dos cabos. ....	41
Tabela 6.7 - Valores da força do vento. ....	42
Tabela 6.8 - Coeficientes de sobrecarga. ....	42
Tabela 6.9 - Resultados obtidos para o vão crítico utilizando o cabo ACCC. ....	43
Tabela 6.10 - Resultados obtidos para o vão crítico utilizando o cabo ACSR. ....	43
Tabela 6.11 - Estado mais desfavorável de cada vão da linha. ....	43
Tabela 6.12 - Características do cabo ACCC utilizado. ....	49
Tabela 6.13 - Valores obtidos para a tração máxima admissível dos cabos. ....	50
Tabela 6.14 - Valores da força do vento. ....	50
Tabela 6.15 - Coeficientes de sobrecarga. ....	50
Tabela 6.16 - Resultado obtido e resultados das medições. ....	51
Tabela A.1 - Características cabo ACSR utilizado. ....	61
Tabela A.2 - Características cabo ACCC utilizado em Alfena. ....	62
Tabela A.3 - Características cabo ACCC utilizado na Figueira da Foz. ....	63

Tabela A.4 - Resultados fornecidos pelo fabricante para o cabo ACSR. ....	64
Tabela A.5 - Resultados fornecidos pelo fabricante para o cabo ACCC. ....	65
Tabela A.6 - Resultados fornecidos pela EDP para o cabo ACSR. ....	66
Tabela A.7 - Resultados obtidos para o cabo ACSR. ....	67
Tabela A.8 - Resultados obtidos para o cabo ACCC, considerando o ponto de Joelho a 100°C. ....	68
Tabela A.9 - Resultados obtidos para o cabo ACCC, considerando o ponto de Joelho a 90°C. ....	69
Tabela A.10 - Resultados obtidos para o cabo ACCC, considerando o ponto de Joelho a 80°C. ....	70
Tabela A.11 - Resultados obtidos para o cabo ACCC. ....	71

# Glossário<sup>1</sup>

**Apoio (ou poste)** - dispositivo destinado a suportar um conjunto de cabos condutores e de guarda, isoladores e acessórios de uma linha elétrica aérea.

**Corredor** - faixa de terreno, ao longo da qual é possível definir o traçado da linha. Os corredores são condicionados pela presença de obstáculos, sejam eles de natureza técnica (declives, obstáculos geomorfológicos, climatológicos, poluição atmosférica), ambientais (zonas protegidas), ou de ocupação de solo (florestas, povoações, presença de outros sistemas lineares de transporte e comunicações, proximidade de aeroportos).

**Flecha de um condutor** - Distância entre o ponto do condutor onde a tangente é paralela à reta que passa pelos pontos de fixação e a intersecção da vertical que passa por esse ponto com esta reta, supostos o condutor não é desviado pelo vento.

**Força máxima de tração ou tração máxima** - Maior força de tração que, numa linha aérea, pode existir no condutor, no cabo de guarda ou nos tensores de cabos isolados, na hipótese de cálculo mais desfavorável, e que se verifica no ponto de fixação de cota mais elevada.

**Linha** - Conjunto de equipamentos que interligam duas ou mais instalações elétricas.

**Rede** - Conjunto de subestações, linhas, cabos e outros equipamentos elétricos ligados entre si com vista a transportar a energia elétrica produzida pelas centrais até aos consumidores.

---

<sup>1</sup> Segundo o artigo 4º, secção IV do RSLEAT (Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão)

**Rede de distribuição** - Parte da rede utilizada para condução da energia elétrica, dentro de uma zona de consumo, para o consumidor final.

**Rede de transporte** - Parte da rede utilizada para o transporte da energia elétrica, em geral e na maior parte dos casos, dos locais de produção para as zonas de distribuição e de consumo.

**Traçado** - Caminho a seguir pela linha no interior de um corredor. Corresponde à localização espacial precisa da linha e é ditado pelas características técnicas desta (ângulos, largura da zona de proteção) e por condicionantes económicas (comprimento, tipo de fundações e postes) e ambientais (minimização dos impactes dentro do corredor).

**Up-rating** - Aumento da capacidade de transporte de energia elétrica de uma linha sem subir o seu nível de tensão.

**Vão** - Porção de linha aérea compreendida entre dois apoios consecutivos.

# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

ACCC	<i>Aluminum Conductor Composite Core</i>
ACSR	<i>Aluminum Conductor Steel Reinforced</i>
DEEC	Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
EDP	Energias de Portugal
EPE	<i>Experimental Plastic Elongation</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HTLS	<i>High Temperature, Low-Sag</i>
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
TW	<i>Trapezoidal Wires</i>

## Lista de símbolos

c	(-)	Coeficiente de forma
d	(m)	Diâmetro do condutor
e	(m)	Espessura do gelo
E	(daN/mm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidade ou módulo de <i>Young</i>
m	(-)	Coeficiente de sobrecarga
F <sub>v</sub>	(daN/m)	Força proveniente da ação do vento
L	(m)	Comprimento do vão
q	(Pa)	Pressão dinâmica do vento
s	(m <sup>2</sup> )	Área da superfície batida pelo vento
t <sub>i,k</sub>	(daN/mm <sup>2</sup> )	Tensão (mecânica) ou tração
T <sub>R</sub>	(daN)	Tensão (mecânica) de rutura
T <sub>seg</sub>	(daN)	Tensão (mecânica) máxima a que o cabo pode ser sujeito
t <sub>max</sub>	(daN/mm <sup>2</sup> )	Tensão (mecânica) de segurança máxima

$\alpha$	(-)	Coeficiente de redução
$\alpha_d$	(°C <sup>-1</sup> )	Coeficiente de dilatação térmica
$\theta_i$	(°C)	Temperatura para o estado mais desfavorável
$\theta_k$	(°C)	Temperatura para o estado desconhecido
$\rho_{\text{gelo}}$	(kg/m <sup>3</sup> )	Peso volumétrico do gelo
$\sigma$	(mm <sup>2</sup> )	Secção do condutor
$\omega$	(daN/m)	Peso próprio do condutor

# Capítulo 1

## Introdução

A energia elétrica apresenta inúmeras vantagens: vasto leque de aplicações, equipamentos com excelentes rendimentos, uma crescente facilidade de produção por parte das pessoas que dantes eram apenas consumidores e cada vez mais produzida por fontes renováveis e não poluentes são razões que a tornam muito atrativa para variadas aplicações. Pode ser produzida a partir de variadas formas: gás, *diesel*, carvão, água e mais recentemente através do sol e do vento. Em Portugal, tem-se assistido a uma enorme proliferação da produção de energia elétrica através de fontes renováveis, principalmente através de energia eólica e solar. Mas também a energia hídrica tem muita importância no nosso país, desde à já alguns anos, permitindo regular os caudais dos rios, o abastecimento de água às populações e o armazenamento de energia. Com a construção de novos aproveitamentos hidroelétricos no âmbito do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH) será possível rentabilizar os recursos hídricos de que Portugal dispõe e que estavam subaproveitados. Além de ajudarem a reduzir a dependência energética do exterior, as barragens, em particular as reversíveis<sup>2</sup>, têm outras vantagens: reforçam a segurança do sistema de abastecimento elétrico e armazenam a energia excedentária produzida pelas eólicas sob a forma de água bombeada de jusante para montante da barragem .

- **Segurança de abastecimento:** A energia eólica e solar são formas de produção intermitentes. Quando não há sol ou vento é necessário continuar a assegurar o fornecimento de eletricidade, recorrendo-se a tecnologias alternativas, como as térmicas e hídricas. As centrais hidrelétricas são a solução que mais rapidamente responde a estas quebras na produção, tal como a inesperados picos de procura.

---

<sup>2</sup> Barragens equipadas com sistema de bombagem.

## 2 Introdução

- **Armazenamento de energia:** Nem sempre os períodos de maior produção de energia eólica correspondem aos de maior consumo. Durante a noite, por exemplo, há mais vento e menos consumo. Para evitar que essa energia injetada na rede seja desaproveitada, as centrais hidroelétricas reversíveis aproveitam para bombear a água, de jusante para montante, reenchendo as albufeiras com água que aí ficará armazenada até haver uma subida do consumo energético que justifique entrada em funcionamento ou reforço da produção da central. Esta flexibilidade ajudará a potenciar a plena utilização dos parques eólicos a instalar no país nos próximos anos.

Nos últimos anos têm sido evidentes as consequências da emissão de gases poluentes para a atmosfera, veja-se por exemplo a existência quase permanente de *smog*<sup>3</sup> em certas cidades da China, que não são uma preocupação meramente local, pois é algo que ameaça alastrar-se a outras zonas. É assim necessário reduzir a emissão de gases poluentes ao máximo o mais brevemente possível. Mais uma vez a energia elétrica destaca-se perante as outras. A sua produção pode vir de fontes não poluentes e renováveis evitando assim a exploração exagerada de recursos naturais limitados. Além disso, mesmo que a produção de energia elétrica seja feita por meio da combustão de gás, *diesel* ou carvão é preferível a outras alternativas pois o rendimento obtido continua a ser superior a outros tipos de energia. Os equipamentos elétricos possuem uma elevada eficiência energética e baixa taxa de avarias, o que leva a uma menor poluição derivada da produção de peças de substituição. Tendo isto em conta, pode-se afirmar que a energia elétrica assume um papel preponderante para que a humanidade continue a existir e a evoluir de forma sustentada.

De facto desde há muito tempo que a energia elétrica assume cada vez mais um papel preponderante na vida das pessoas. Uma sociedade fortemente industrializada não sobrevive sem este recurso. Torna-se assim essencial disponibilizar este recurso com altos níveis de qualidade e fiabilidade.

Por forma a fazer chegar a energia elétrica aos consumidores é necessária uma rede de transporte e distribuição de energia elétrica. Como as linhas de transporte são parte fulcral, para um sistema elétrico, a fiabilidade que se espera é bastante elevada. Caso contrário, coloca-se em questão a qualidade de serviço. As quebras no fornecimento de energia são algo muito penalizador para os comercializadores de energia elétrica e para os operadores da rede, já que as quebras no fornecimento de energia elétrica acarretam penalizações a serem pagas aos clientes afetados, clientes esses que podem ter prejuízos bastante consideráveis. Pense-se numa unidade fabril a ficar impossibilitada de produzir durante um determinado período de tempo. E se em vez de uma fábrica for um parque industrial inteiro? Os prejuízos

---

<sup>3</sup> Nevoeiro contaminado por fumo.



seriam catastróficos. Claro que existem unidades de emergência que, caso a rede falhe, entram em serviço para evitar situações de avultados prejuízos, mas o ideal será que essas unidades nunca sejam necessárias. Assim sendo, é requerido à rede de transporte e distribuição de energia elétrica que apresente altos índices de fiabilidade.

A corrente elétrica circula pela rede de transporte, principalmente, através de cabos constituídos pelo elemento condutor de alumínio enrolado em torno de um núcleo de aço que suporta a carga estrutural do cabo, sendo este tipo de cabo comumente designado por ACSR. Este tipo de cabos possui um longo tempo de vida útil e boa parte dos que se encontram em funcionamento já o fazem à mais de trinta anos. Mas como é óbvio estes cabos também possuem limitações. A corrente máxima que podem transportar sem sofrer danos irreversíveis ou as suas flechas excederem os máximos admissíveis, devido ao aquecimento, os esforços mecânicos máximos que aguentam derivados das condições climáticas a que estão expostos e o inevitável fim do seu tempo de vida útil são algumas dessas limitações. Adicionando-se a estas limitações a complexidade que a construção de uma linha de transporte de energia elétrica abarca, torna-se interessante para as empresas exploradoras de redes de transporte de energia elétrica a existência de alternativas à construção de novas linhas.

Algo que pode ser uma solução são os condutores de alta temperatura (designação inglesa: *high temperature low-sag*).

## 1.1. Motivação e Objetivos

Por mais de cem anos que o aço vem sendo utilizado como núcleo dos cabos elétricos em linhas aéreas, mas em certos casos o comportamento destes cabos pode deixar algo a desejar, seja na temperatura máxima a que podem ser sujeitos, no comprimento máximo que os vãos podem ter ou na dimensão das flechas que geram.

Quando os condutores convencionais são incapazes de satisfazer as necessidades recorre-se aos cabos de alta temperatura. Estes cabos são capazes de transportar correntes mais elevadas, atingindo temperaturas que os cabos tradicionais são incapazes de suportar. Existem vários cabos destes no mercado, tais como o ACCR (*Aluminum Conductor Composite Reinforced*) ou o ACSS (*Aluminum Conductor Steel Supported*), mas continuam a ser bastante similares à receita tradicional. Contudo recentemente surgiu o cabo ACCC (*Aluminum Conductor Composite Core*) que inova no que diz respeito ao material usado no núcleo do cabo. Ao invés do material do núcleo ser aço ou ferro ou qualquer um outro metal, o núcleo do cabo é constituído por um compósito de carbono.

Esta inovação torna o comportamento do cabo, quando sujeito a diferenças de temperatura, diferente do comportamento verificado nos restantes cabos. Também comparativamente aos restantes cabos altera as propriedades mecânicas do cabo, bem como os pontos frágeis ao longo de uma linha. Esta dissertação é focada no cabo ACCC, desde a sua

constituição até às situações onde a sua aplicação poderá ser mais vantajosa, passando pelas vantagens e desvantagens que acarreta com o objetivo de aprofundar os conhecimentos sobre o referido cabo por forma a tirar o maior proveito da sua aplicação.

### 1.2. Estrutura da Dissertação

O trabalho está dividido em sete capítulos. No Capítulo 2 é feita a descrição do cabo ACCC em estudo. O cabo é apresentado ao mesmo tempo que é comparado com o cabo convencional ACSR. São descritos os materiais usados no núcleo do cabo, bem como o material condutor. São apresentados as características dos materiais com mais relevância para a finalidade em questão.

No Capítulo 3 são apresentadas as vantagens e desvantagens associadas à utilização do cabo, estando relacionadas com as características que o cabo apresenta.

No Capítulo 4 é discutida a aplicação do cabo em linhas de transporte de energia, tanto na construção de novas linhas como no *up-rating* de linhas existentes. São também referidos alguns casos particulares em que a aplicação do cabo ACCC pode ter especial interesse.

No Capítulo 5 são abordados os aspetos mecânicos mais relevantes de um cabo para linhas aéreas: a elasticidade e dilatação com a temperatura e a capacidade de resistir a agressões externas, como o vento e o gelo.

No Capítulo 6 é estudado o comportamento térmico do cabo que influencia a dimensão das flechas. É sugerido uma abordagem para o cálculo das flechas quando são usados cabos ACCC e são feitos cálculos para exemplos reais. Os resultados obtidos são comparados com os resultados fornecidos pelo fabricante do cabo e da EDP e também com medições efetuadas no terreno com o cabo em funcionamento.

No último capítulo são referidas as principais conclusões retiradas da realização desta dissertação. Sendo também referido possíveis trabalhos futuros, a realizar dentro deste tema.

Por fim, em anexo, é possível consultar informação com relevância para o entendimento de alguns aspetos, avançados ao longo do trabalho. Para maior facilidade de consulta, durante o relatório são referidos quais os anexos a consultar.

## Capítulo 2

### Descrição do Cabo ACCC

O cabo ACCC apresenta algumas inovações relativamente aos cabos convencionais, algo facilmente perceptível pela observação da Figura 2.1.

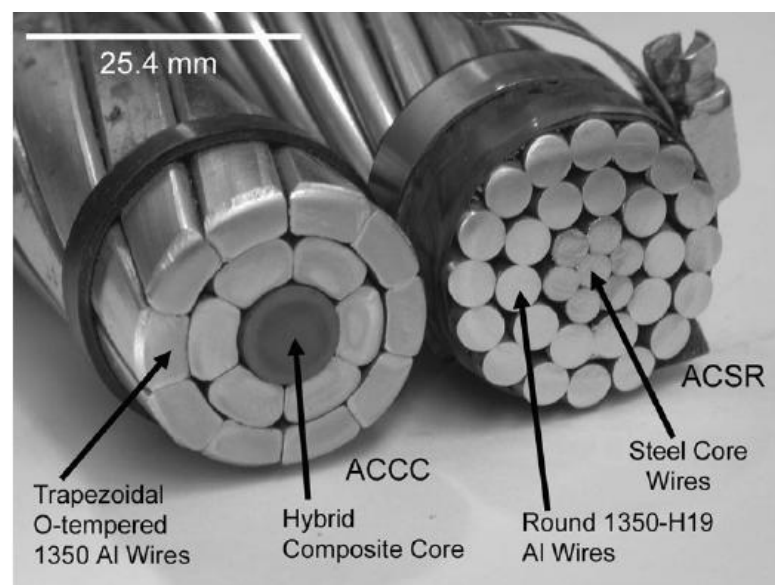


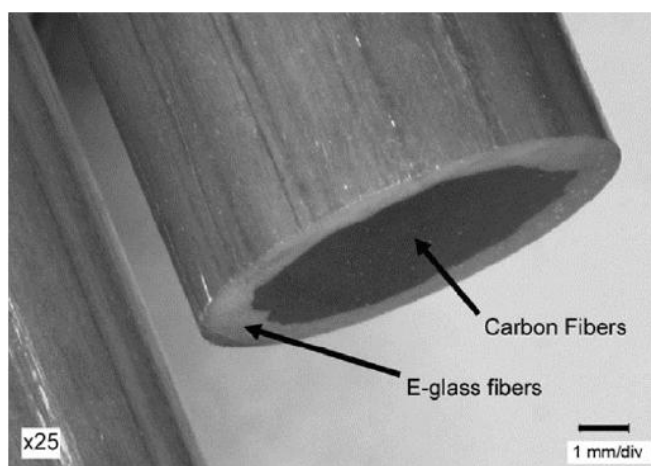
Figura 2.1 - Comparação entre o cabo ACCC e o cabo ACSR.

O cabo ACCC será apresentado fazendo a comparação entre este e o cabo convencional ACSR. A razão pela qual será utilizado o cabo ACSR para fazer a comparação e estabelecer as diferenças que tornam o cabo ACCC único, prende-se com o facto de esse estar aplicado em larga escala e ser um exemplo perfeito de um cabo convencional.

Seguidamente são apresentados todos os aspetos construtivos que fazem do cabo ACCC uma solução para muitos problemas que possam surgir numa rede de transporte de energia elétrica.

## 2.1. O Núcleo

A grande diferença relativamente aos outros cabos é que torna o cabo ACCC único encontra-se no núcleo. Neste cabo o aço foi trocado por um compósito de fibra de carbono/fibra de vidro ligados por meio de uma resina *epoxy*<sup>4</sup>. A fibra de carbono (Toray T700) [5] [6] situa-se no centro e é envolvida por um revestimento de fibra de vidro, como é possível observar na Figura 2.2.



**Figura 2.2** - Núcleo compósito do cabo ACCC. No centro as fibras de carbono revestidas pelas fibras de vidro.

O núcleo do cabo ACCC tira partido das características particulares da fibra de carbono que apesar de muito leves são extremamente resistentes e possuem um baixo coeficiente de dilatação, tão importante para evitar flechas grandes.

A camada de fibra de vidro incorporada no núcleo tem a função de dielétrico, servindo para isolar as fibras de carbono dos filamentos de alumínio, prevenindo assim uma potencial reação galvânica [6].

O núcleo compósito é concebido como uma peça só, sólida, ao contrário dos núcleos de aço dos condutores convencionais, como o ACSR, que consiste em filamentos de aço enrolados em torno de si próprios, o que dá origem a espaços vazios entre os filamentos, originando um maior volume global do cabo. O núcleo compósito do cabo ACCC, sendo uma peça única, permite que um núcleo com menor diâmetro tenha uma secção transversal maior e aguente forças de tração maiores que um núcleo de aço.

No cabo ACCC os limites térmicos são impostos pelo núcleo já que o alumínio nele usado é tratado por forma a resistir temperaturas muito elevadas, como será explicado mais à frente. Depois de testes exaustivos foi estabelecida para temperatura máxima admissível em regime permanente 180°C [22], e atingir os 200°C em regime transitório. Só é possível atingir esta

---

<sup>4</sup> Resina *epoxy* é um plástico termofixo que endurece quando se mistura com um agente catalisador.

temperatura, também, graças ao pequeno coeficiente de dilatação que o compósito de fibra de carbono/fibra de vidro apresenta, como se verá mais à frente. Os cabos convencionais nunca conseguiriam atingir esta gama de temperaturas em regime permanente, porque os materiais que os compõem perderiam características mecânicas e dilatariam em excesso.

As vantagens deste compósito face ao aço utilizado nos cabos convencionais é facilmente perceptível por observação da Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** - Propriedades do núcleo utilizado nos cabos ACCC e ACSR [22].

Cabo	Material do Núcleo	Peso (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tração máxima admissível (MPa)	Coeficiente de Expansão Térmica (x10 <sup>-6</sup> /°C)
ACCC	Compósito carbono/fibra vidro	1,94	110-144	2275-2585	1,6
ACSR	Aço galvanizado	7,78	199	1516	11,5

Analisando os valores apresentados na Tabela 2.1, verifica-se que o compósito usado como núcleo do cabo ACCC é quase sete vezes mais leve que o aço e muito mais resistente à tração, o que são ótimas propriedades para um cabo utilizado em linhas aéreas. Significa que é possível obter um cabo mais leve, mas mais resistente que um cabo com um núcleo de aço. Para tornar o compósito ainda mais apetecível soma-se o facto de o coeficiente de expansão térmica deste ser dez vezes menor que o do aço. Isto significa que um cabo usando o compósito de fibra de carbono/fibra de vidro dará origem a flechas menores que um cabo com núcleo em aço. É graças a este pequeno coeficiente de expansão que é possível este cabo operar em regime permanente a 180°C, porque apesar da elevada temperatura a expansão do cabo, e consequente flecha que origina, não são demasiado grandes. O único aspeto em que o aço apresenta valores mais interessante que o compósito de fibra de carbono/fibra de vidro é no módulo de elasticidade. Tendo o compósito um módulo de elasticidade menor que o aço significa que vai esticar mais facilmente que este. Contudo, o núcleo do cabo ACCC é puramente elástico e a carga que sustenta não vai deforma-lo permanentemente [22].

Por tudo isto é possível que um cabo ACCC possua um núcleo de menor diâmetro, ocupando, portanto, menos espaço sendo, simultaneamente, tão ou mais forte que um cabo ACSR, de igual secção. Isto significa que é possível adicionar mais alumínio e reduzir a resistência elétrica do cabo. Concluindo: para uma mesma secção, um cabo ACCC terá mais alumínio, e consequentemente menos resistividade elétrica, que um cabo convencional ACSR; isto graças ao núcleo de compósito de fibra de carbono/fibra de vidro.

## 2.2. O Condutor

À semelhança dos condutores convencionais o material condutor presente no cabo ACCC é o alumínio. A boa condutividade que apresenta, as boas propriedades mecânicas, o baixo preço e a facilidade de manuseamento continuam a fazer do alumínio a melhor escolha para condutores usados em linhas aéreas.

Contudo o tipo de alumínio usado no cabo ACCC é diferente do alumínio usado nos cabos convencionais. Nos cabos ACSR o alumínio usado designa-se 1350-H19, e nos cabos de alta temperatura 1350-O. Estes dois tipos de alumínio distinguem-se devido ao tratamento que é dado ao alumínio 1350-O, sendo este pré-recozido. O recozimento reduz a resistência mecânica mas favorece a condutibilidade e resistência à fadiga, já que fissuras provocadas por fadiga não se propagarão tão rapidamente através de materiais mais suaves e dúcteis. Várias ligas podem melhorar a resistência, embora o façam à custa de uma perda notável de condutividade e ductilidade [22]. Neste caso esta perda de resistência não afeta o comportamento resultante da estrutura final do cabo, pois, como já foi visto atrás, a resistência do compósito do núcleo é grande e consegue aguentar os esforços a que o cabo é submetido sem necessitar do auxílio do alumínio.

Na Tabela 2.2 são descritos os tipos de alumínio usados no cabo ACCC e no cabo ACSR.

**Tabela 2.2** - Propriedades do alumínio utilizado nos cabos ACCC e ACSR [22].

Cabo	Alumínio	Condutividade (%IACS) <sup>5</sup>	Tensão máxima admissível (MPa)	Temp. Máx. Op. Em Regime Permanente (°C)
ACCC	1350-O	63	41-96	250
ACSR	1350-H19	61,2	158-172	90

Como é possível observar na tabela acima apresentada, o alumínio 1350-O usado no cabo ACCC apresenta uma condutividade ligeiramente melhor que o 1350-H19 usado no cabo ACSR, resultado de ser pré-recozido. A temperatura máxima operando em regime permanente que o alumínio 1350-O é capaz de suportar (250°C) também se deve ao referido tratamento e é tão elevada que, como atrás foi dito, os limites térmicos do cabo ACCC são impostos pelo núcleo porque o condutor consegue operar a temperaturas bastante elevadas.

<sup>5</sup> Os valores da condutividade são apresentados como uma percentagem em comparação com cobre recozido, pela *International Annealed Copper Standard* ("IACS"). Um valor de 100% corresponde a uma condutividade de  $5,8 \times 10^7$  Siemens por metro (S/m).

Mas não é só o tipo de alumínio que é diferente; a forma também é diferente. Ao contrário dos cabos convencionais, nos cabos ACCC os filamentos de alumínio têm formato trapezoidal, daí muitas vezes a designação do cabo apareça como ACCC/TW (*Aluminum Conductor Composite Core/ Trapezoidal Wires*), fazendo uma referência adicional a mais esta característica. Adotando este formato para os filamentos de alumínio é possível preencher a maior parte da área da secção transversal disponível, originando assim uma maior área de alumínio por onde a corrente elétrica pode circular e, conseqüentemente diminuindo a resistência e as perdas. Este melhor aproveitamento do espaço, combinado com o facto de o núcleo ser menor, permite que, para um mesmo diâmetro, o cabo ACCC possa ter até quase mais 28% de alumínio que o cabo ACSR. Isto leva a que um cabo ACCC seja capaz de transportar mais corrente elétrica que um cabo ACSR de igual secção [5].





## Capítulo 3

# Vantagens e Desvantagens

Apesar de todas as novas características que apresenta e vantagens que acarretam, há também inconvenientes que é preciso ter em conta na hora de escolher, ou não, o cabo ACCC para aplicar numa linha. Neste capítulo serão apresentadas as vantagens e desvantagens que são necessárias ter em conta na hora de decidir se a melhor opção é utilizar o cabo ACCC numa linha, ou se se deve adotar outra solução.

### 3.1. Vantagens

#### 3.1.1. Dimensão da flecha

Graças ao reduzido valor do coeficiente de expansão térmica que o núcleo do cabo ACCC, o coeficiente de expansão térmica do cabo também será menor; isto permite menores flechas do que os cabos convencionais para as mesmas condições de operação (Figura 3.1). Este aspeto é muito benéfico pois frequentemente na fase de projeto e construção de linhas de transporte de energia elétrica, muitos problemas estão relacionados com as distâncias mínimas a respeitar, estipuladas pela legislação. Além disso flechas demasiado grandes facilitam a ocorrência de curto-circuitos devido a contactos com obstáculos, normalmente árvores que crescem demasiado e não são aparadas.

Exemplo disso foi o *blackout* que ocorreu no noroeste dos Estados Unidos da América em Agosto de 2003 que teve origem em curto-circuitos fase-terra provocados pelo contacto de condutores com árvores que cresceram demasiado e obstruíram o corredor das linhas e que não foram prontamente cortadas para que não ocorressem tais acidentes. As linhas não se encontravam a trabalhar à sua capacidade máxima e mesmo assim os condutores colidiram com as árvores originando o acidente que colocou cinquenta milhões de pessoas sem energia elétrica durante dois dias [31].

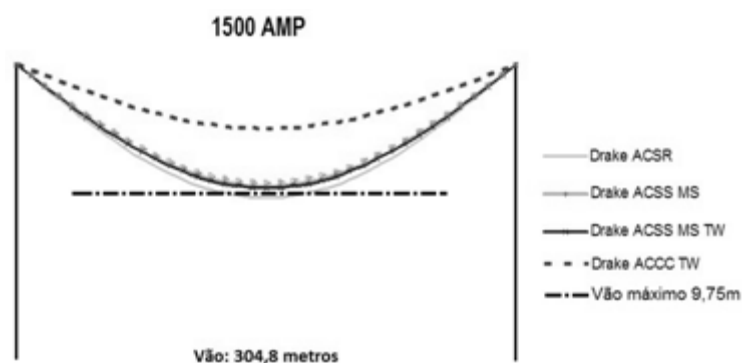


Figura 3.1 - Comparação da dimensão da flecha (adaptado de [15]).

### 3.1.2. Ausência de deformação temporal

Derivado do comportamento elástico do núcleo compósito, a deformação que o cabo ACCC apresenta com a passagem do tempo é praticamente nula. Apesar das forças que poderão atuar sobre a linha, como a força do vento ou o peso provocado pela formação de gelo, o cabo voltará à sua forma inicial. Isto significa que as distâncias calculadas na fase de projeto dificilmente se alteram e não será necessário recorrer a ajustes nos apoios e na linha para retificar as distâncias a obstáculos.

### 3.1.3. Menor corrosão

Com o núcleo compósito elimina-se a bi-metalidade existente nos cabos convencionais e a corrosão química resultante da interação de dois metais. Não sendo o núcleo metálico os fenômenos de corrosão que podem afetar o cabo são reduzidos, o que se traduz numa redução da manutenção que o cabo necessitará para ter um longo período de vida útil.

### 3.1.4. Maior capacidade de transporte e menores perdas

Com a capacidade de aguentar altas temperaturas o cabo ACCC permite que seja transportada mais corrente do que nos condutores tradicionais. Para além da vantagem óbvia de se poder fazer circular mais corrente pela mesma linha é também possível ter-se uma maior adaptabilidade para fazer circular a corrente elétrica, sem que haja risco de sobrecargas, caso ocorram defeitos noutras linhas e seja necessário reconfigurar a rede.

Para a mesma corrente a circular num cabo ACCC e num cabo convencional, o primeiro tem menores perdas devido à maior condutividade e à maior quantidade de alumínio que o constituiu e que reduzem a resistência. Também a ausência de um núcleo de aço contribui para a redução das perdas. Com a ausência de um núcleo de aço o cabo não exhibe perdas por histerese magnética.

### 3.1.5. Poupança nos apoios

Na construção de novas linhas usando o cabo ACCC não são necessários apoios tão robustos, como os que são utilizados para suportar cabos convencionais, pois os cabos que terão de suportar serão mais leves. Os apoios também não necessitam de ser tão altos porque como as flechas são menores não há necessidade de elevar a posição dos cabos para haver uma margem de segurança para a sua dilatação. Convém referir que apoios menos robustos e mais baixos são mais baratos.

Os vãos também podem ser maiores devido à leveza do cabo e à tensão de amarração que se pode aplicar. Assim sendo na construção de uma nova linha utilizando cabos ACCC, é possível poupar nos apoios em dois aspetos: apoios utilizar menos apoios e mais baratos.

Também no caso de *up-rating* de uma linha através da substituição dos cabos, não será, forçosamente, necessária intervenção nos apoios existentes, pois se estes eram adequados para suportar os cabos removidos também serão para suportar os cabos ACCC a instalar.

## 3.2. Desvantagens

### 3.2.1. Preço

A questão do preço pode ser uma falsa desvantagem, porque embora o cabo ACCC seja, efetivamente, mais caro que os cabos convencionais, não quer dizer que uma linha construída usando este cabo seja mais cara do que se usar-se um cabo convencional, pois como já foi referido ao usar o cabo ACCC é possível poupar nos apoios. Posto isto, pode-se afirmar que cada caso é um caso e que apesar de o cabo ACCC ser mais caro que os restantes, pode tornar o custo global da obra mais barato.

### 3.2.2. Limitações impostas por outros equipamentos

Algo que é passível de acontecer é que não seja possível tirar partido de toda a capacidade de transporte do cabo ACCC devido a equipamentos que com capacidade inferior que estejam em série com este. Por exemplo: se uma linha for capaz de transportar 150MVA, mas estiver ligada a uma subestação equipada com um transformador de potência nominal 100MVA, nunca se irá tirar partido de toda a potencialidade de linha e não se tirará o máximo proveito do investimento feito. Esta desvantagem diz mais respeito aos casos de *up-rating*, em que já existem outros equipamentos colocados ao longo da linha. Na construção de novas linhas este problema não deverá existir, pois o dimensionamento dos equipamentos será feito de acordo com os requisitos estipulados para o funcionamento da linha.

### 3.2.3. Acessórios e instalação

Com a inserção do núcleo composto, os cuidados a ter ao manusear o cabo e a instalá-lo são diferentes de um cabo convencional. Apesar de o fabricante afirmar que os procedimentos não são diferentes dos de um cabo convencional, as recomendações presentes no guia de instalação [24] são óbvias e contrariam, em alguns aspetos, as afirmações do fabricante. Esses cuidados em conjunto com o facto de alguns dos acessórios usados serem diferentes dos cabos convencionais, tornam necessário que os agentes instaladores dos cabos estejam preparados para trabalhar com o cabo ACCC.

### 3.2.4. Funcionamento a altas temperaturas

Apesar de o cabo ACCC ser capaz de funcionar a altas temperaturas, existem outros órgãos numa linha de transporte de energia elétrica que estarão em contacto com o cabo e que podem não resistir a temperaturas tão elevadas e dar origem a avarias ou acidentes.

Para além dos equipamentos em contacto com o cabo, há também o caso do arrefecimento do cabo. Sendo necessária uma intervenção sobre a linha, em que se tenha que desligar a linha no próprio instante, o cabo não arrefece de um momento para o outro, é necessário um intervalo de tempo maior para que o cabo arrefeça e seja possível a um humano intervir sem risco de queimaduras.

Outro cenário não muito claro e que lança dúvidas tem a ver com água da chuva que se possa infiltrar nas fendas entre os filamentos de alumínio quando o cabo estiver a baixas temperaturas. Com o aumento destas, a ebulição da água pode desencadear reações indesejadas que danifiquem o cabo.

Já do ponto de vista social talvez seja interessante esclarecer as pessoas para o funcionamento das linhas a altas temperaturas, para evitar situações desagradáveis. Por exemplo: uma linha a funcionar a 180°C num dia chuvoso pode dar a ilusão, a algumas pessoas, da linha estar a fumer e que pode estar a desencadear-se um incêndio, quando na verdade é apenas a água da chuva a entrar em ebulição aquando o contacto com a linha.

### 3.2.5. Comportamento descontínuo

Com a capacidade de trabalhar numa gama de temperaturas tão vasta, o comportamento dos materiais constituintes do cabo, em particular o alumínio, modifica-se a uma dada temperatura, o chamado ponto de joelho. Isto provoca uma mudança nas características do cabo, nomeadamente no módulo de *Young* e no coeficiente de dilatação térmica, o que provoca alterações no cálculo das tensões de amarração dos condutores que ainda não são claras. Este aspeto será abordado com maior pormenor no Capítulo 6 deste documento.

# Capítulo 4

## Aplicações

### 4.1. Construção de uma nova linha

Na construção de uma nova linha em que se planeie usar o cabo ACCC, e como em qualquer projeto, é necessário ter em atenção múltiplos fatores e cenários para tomar uma decisão informada. Decisão essa que pode ser escolher outro cabo que não o ACCC.

Especificamente no projeto de uma linha à que ter em atenção várias condicionantes:

- **Condições Técnicas:** Respeitar os limites impostos pelos equipamentos (esforços máximos aplicados aos apoios e condutores), quedas de tensão, perdas de energia, rendimentos, entre outros.
- **Condições de Segurança:** Respeitar as distâncias mínimas impostas pelo RSLEAT (Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão).
- **Condições Económicas:** Tentar minimizar os encargos financeiros inerentes à construção da linha de transmissão de energia elétrica, através da redução do número de apoios e da secção dos condutores.
- **Condições Burocráticas:** O traçado da linha elétrica induz a necessidade de obter pedidos de autorização de proprietários pela colocação de apoios nas suas propriedades, sendo necessário proceder a indemnizações. Refira-se que esta situação nem sempre é fácil de solucionar.
- **Condições Ambientais:** A inserção de apoios, dependendo da fauna e flora existentes no local, impõe a necessidade de cumprir as imposições regulamentares. Para além disso refira-se que existem condicionantes no que diz respeito à escolha do traçado da linha elétrica devido à topografia do terreno.

É extremamente importante referir que aquando da realização do projeto é necessário respeitar escrupulosamente todas as disposições legais alusivas à conceção de linhas de transmissão de energia elétrica, em Alta Tensão.

Tendo presentes todas estas condições, vários estudos têm que ser feitos aquando da construção de uma nova linha de transporte de energia elétrica para analisar todas as alternativas existentes e de entre elas escolher a mais vantajosa em termos financeiros, técnicos, regulamentares e ambientais.

Na construção de uma nova linha de transporte de energia elétrica os atrativos que o cabo ACCC pode trazer com a sua utilização derivam das vantagens apresentadas no Capítulo 3 e podem ser:

- Utilização de menos apoios em toda a extensão da linha, reduzindo assim o custo total da obra;
- Resultante de não se utilizar tantos apoios não são necessárias tantas permissões de proprietários de terrenos para a colocação de apoios, evitando-se assim situações muitas vezes litigiosas;
- Maior capacidade de transporte permite maior facilidade de reconfiguração da rede elétrica caso seja necessário;
- As flechas menores que o cabo ACCC origina podem facilitar o respeito pelas distâncias mínimas a obstáculos podendo facilitar a escolha do traçado.

### 4.2. *Up-rating* de uma linha existente

A construção de novas linhas de transporte de energia elétrica pode ser um processo muito difícil de levar a cabo. Assim sendo, tornou-se, em muitos casos, mais interessante fazer o *up-rating* de uma linha já existente. O *up-rating* de uma linha pode ser feito das seguintes maneiras [12]:

- Elevação dos Apoios;
- Passagem do poste de suspensão a amarração;
- Reposição da tensão mecânica dos condutores;
- Substituição dos condutores;
- Monitorização da flecha;
- Monitorização de condutores.

Em algumas situações não é usada apenas uma solução, mas sim varias soluções em conjunto.

Vários problemas que podem surgir aquando da construção de novas linhas podem ser evitados usando a soluções de *up-rating*. Caso sejam adotadas soluções de monitorização as

intervenções no terreno serão ínfimas, contudo o aumento da capacidade de transporte conseguido através destas medidas também é inferior comparativamente ao conseguido através de modificações físicas da linha. A intervenção sobre uma linha já existente também não acarreta tantos problemas como a construção de uma nova linha e é possível conseguir melhorias na capacidade de transporte muito significativas. Há também que ter presente que quando se faz o *up-rating* de uma linha também poderá ser necessário fazer melhorias na subestação a que a linha se encontra ligada caso ela não tenha capacidade de receber o acréscimo de potência requerido.

O primeiro aspeto a ter em conta aquando da decisão sobre que solução usar para fazer o *up-rating* de uma linha é o porquê de fazer a intervenção sobre a linha. Com o aumento dos consumos a capacidade de transporte da linha deixou de ser suficiente para os satisfazer, foi construída uma nova central e a linha não tem capacidade de transportar a potência agora exigida, o tempo de vida útil dos condutores em condições de funcionamento aceitáveis expirou ou novas construções feitas nas imediações do corredor da linha obrigam a elevar a posição dos condutores são algumas das razões que podem motivar a realização do *up-rating* de uma linha. Dependendo da razão que motiva a intervenção sobre uma linha a solução ideal pode não passar pela substituição dos condutores.

Assumindo que a solução a adotar para o *up-rating* de uma linha passará pela substituição dos condutores, não significa que a escolha ótima seja o cabo ACCC. Tudo depende dos objetivos que se queiram atingir e neste caso o facto de o cabo ACCC ser mais caro que as alternativas pode levar a que não seja escolhido. Se o pretendido for somente substituir os condutores, sem intervir de forma nenhuma sobre os apoios, os principais custos associados serão o custo do cabo e a instalação do mesmo. Como já foi dito o cabo ACCC é mais caro que as restantes alternativas do mercado e se o único critério de decisão for qual o cabo mais barato, certamente não será o escolhido. Porém, há outros critérios a ter em conta na altura de tomar uma decisão destas (estamos a falar de um problema multi-atributo), como as perdas que o condutor originará e o seu custo, o tempo de vida útil do equipamento ou se o condutor escolhido implicará, forçosamente, intervenções nos apoios e assim, ao ter os vários fatores em conta, o cabo ACCC pode ser a melhor escolha, apesar de ser mais caro.

### 4.3. Casos Especiais

Existem certas situações em que a utilização de cabos ACCC pode ter especial interesse, por várias razões, e a sua utilização melhora significativamente a performance e fiabilidade do sistema e previne situações desagradáveis e até de perigo.

#### 4.3.1. Interligações entre áreas de controlo

Sendo que as interligações entre áreas de controlo são pontos da rede suscetíveis de sobrecargas, ainda que momentâneas, devido a saídas de serviço de outras linhas ou de manobras, poderia ser especialmente interessante a aplicação do cabo ACCC nestes pontos da rede. Equipando as interligações entre duas áreas de controlo vizinhas com cabos ACCC a capacidade de transporte aumentaria sendo assim possível evitar sobrecargas fortuitas e também possibilitando uma maior troca de energia, beneficiando também o mercado de energia elétrica.

#### 4.3.2. Travessias de obstáculos

A possibilidade que o cabo ACCC permite de se usarem vãos maiores e de criarem flechas menores, comparativamente com os vãos e flechas que os cabos convencionais permitiam, facilita a travessia de obstáculos que surjam no traçado. Veja-se o exemplo de um rio com uma distância entre margens muito grande; usando o cabo ACCC pode ser possível colocar um apoio em cada margem para suspender o cabo sem que a flecha criada assuma valores proibitivos, ao passo que se fosse usado um cabo convencional poderia ser necessário instalar um apoio no leito do rio para a flecha não infringir os valores normativos.

Um exemplo de uma situação desta categoria encontra-se na Figueira da Foz. Esse caso será abordado mais à frente em pormenor.

#### 4.3.3. Zonas de desgaste rápido

Certas zonas, como por exemplo zonas costeiras ou zonas próximas de certas indústrias, são especialmente agressivas para os cabos e aceleram o seu desgaste. Os cabos convencionais são sensíveis a estas agressões externas devido à sua constituição ser totalmente metálica, materiais esses sensíveis à corrosão. O cabo ACCC com o seu núcleo não-metálico não é tão afetado por estes agentes agressores externos dando ao cabo uma longevidade maior, sem a necessidade de manutenção, comparativamente aos cabos convencionais.

#### 4.3.4. Zonas protegidas

Graças à possibilidade de se usarem menos apoios numa linha equipada com o cabo ACCC, caso seja necessário atravessar uma zona natural protegida, o impacto nela criado será menor, já que com a colocação de menos apoios a intervenção na paisagem e perturbação do ecossistema será menor. Este aspeto pode ser muito importante para facilitar a construção de novas linhas cujo traçado tenha, necessariamente, que passar por zonas protegidas, porque



não é novidade os entraves e problemas que surgem por parte dos ambientalistas quando está em causa a intervenção humana na natureza.

Pode também suceder o caso de ser possível evitar de todo a passagem por uma zona protegida, utilizando um percurso alternativo que seria impossível de adotar usando cabos convencionais.



# Capítulo 5

## Comportamento Mecânico

As características mecânicas dos condutores aéreos nus definem a sua flecha e resposta à tração nos vários cenários possíveis de acontecer, formação de gelo, presença de vento, cargas pontuais, a mudança de temperatura e outras variações atmosféricas. Condutores ACCC são suficientemente diferentes de todos os outros condutores na sua composição que a sua flecha e resposta às cargas de tensão, temperatura e condições climáticas seja também diferente. Neste capítulo será abordado o comportamento do cabo ACCC a solicitações mecânicas. A variação da dimensão da flecha com a temperatura do cabo será abordada no Capítulo 6.

### 5.1. Relação Solicitação-Deformação

Quando uma tensão mecânica é inicialmente aplicada a um novo condutor, composto por dois materiais, a carga é partilhada pelo núcleo e pelos fios condutores. Com a passagem do tempo, cada material responde de maneira diferente à tensão e à temperatura, o que implica que a partilha da carga entre eles irá mudar.

Para se aferir a partir de que valor de tensão mecânica o cabo começa a revelar deformações na sua estrutura é necessário recorrer a ensaios. Apesar de a resistência à tração ser um valor calculado traduz muito bem o ponto de rutura de um condutor e os testes servem para confirmar esse valor. Tais testes consistem na aplicação de uma determinada tensão no cabo, durante um certo período de tempo, após o qual o cabo volta ao estado de relaxamento e é averiguado se apresenta deformação permanente.

Este teste aplicado ao cabo ACCC permitiu concluir que o núcleo compósito é perfeitamente elástico e que também não experiencia deformação permanente ou alongamento. No que diz respeito ao alumínio, verificou-se que cede com uma carga relativamente baixa e em seguida alonga plasticamente. Em resultado o alumínio deixa de contribuir para suportar a carga e somente o núcleo o faz [22].

Este comportamento pode dar azo a classificar o alumínio como fisicamente fraco; porém este comportamento pode ser muito interessante para manipular o ponto de Joelho, como será mostrado mais à frente.

## 5.2. Elasticidade e dilatação do material

Sendo um cabo constituído por dois materiais diferentes (fios condutores e núcleo) ambos os materiais irão contribuir para o seu comportamento, mais ou menos, elástico quando sujeito ao aumento ou diminuição da temperatura ou suporte carga mecânica. Assim, tendo em conta os valores que refletem o comportamento de cada um dos materiais isoladamente, é possível calcular-se o módulo de *Young* e o coeficiente de expansão térmica através das seguintes equações [1]:

$$E_{cabo} = \frac{E_{cond} \cdot \sigma_{cond} + E_{núcleo} \cdot \sigma_{núcleo}}{\sigma_{cabo}} \quad (5.1)$$

$$\alpha_{d\ cabo} = \frac{E_{cond} \cdot \sigma_{cond} \cdot \alpha_{d\ cond} + E_{núcleo} \cdot \sigma_{núcleo} \cdot \alpha_{d\ núcleo}}{E_{cabo} \cdot \sigma_{cabo}} \quad (5.2)$$

Onde:

- $\alpha_{d\ cabo}$  - coeficiente de dilatação térmica do cabo;
- $\alpha_{d\ cond}$  - coeficiente de dilatação térmica do elemento condutor;
- $\alpha_{d\ núcleo}$  - coeficiente de dilatação térmica do núcleo;
- $E_{cabo}$  - módulo de elasticidade ou módulo de *Young* do cabo;
- $E_{cond}$  - módulo de elasticidade ou módulo de *Young* do elemento condutor;
- $E_{núcleo}$  - módulo de elasticidade ou módulo de *Young* do núcleo;
- $\sigma_{cabo}$  - secção do cabo;
- $\sigma_{cond}$  - secção do elemento condutor;
- $\sigma_{núcleo}$  - secção do núcleo.

Para o cabo ACCC os valores usados para o módulo de *Young* e para o coeficiente de expansão térmica do alumínio e do compósito do núcleo são [22]:

- $E_{Al} = 51 \text{ a } 56,8 \text{ GPa}$  - este valor é inferior ao tipicamente atribuído ao alumínio (69 GPa). Os fios de alumínio são enrolados helicoidalmente em torno do núcleo e é esta torção que reduz o módulo de *Young* do alumínio.
- $\alpha_{Al} = 23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  - um valor típico para alumínio da gama 1350.

- $E_{\text{compósito}} = 112,3 \text{ ou } 116 \text{ GPa}$  - dependendo do calibre do cabo.
- $\alpha_{\text{compósito}} = 1,61 \times 10^{-6} \text{ ou } 1,45 \times 10^{-6}$  - dependendo do calibre do cabo.

Porém, há que ter em atenção que não existe apenas um único valor, para cada um destes índices, que caracteriza o cabo ACCC. O valor do módulo de *Young* e do coeficiente de expansão térmica vão mudar dependendo se o alumínio suporta alguma carga mecânica ou se só o núcleo o faz. Isto quer dizer que o módulo de *Young* e o coeficiente de expansão térmica apresentam valores que descrevem o comportamento do cabo antes e depois do ponto de joelho, já que o comportamento do cabo é diferente em cada uma destas regiões distintas.

### 5.3. Vibração eólica

Quando um fluxo constante de vento passa por um objeto cilíndrico, tal como um condutor aéreo de energia elétrica, vórtices (redemoinhos) são formados na parte oposta à incidência do ar. Esses vórtices alternam entre as superfícies inferior e superior e criam pressões alternadas que fazem com que o cabo se mova para cima e para baixo em ângulo reto com a direção do vento. Quando a frequência das forças induzidas pelo vento iguala a frequência natural do condutor dá-se o fenómeno de ressonância, fazendo com que a amplitude desse harmónico em particular cresça e aumente a fadiga entre as extremidades do cabo (i. e., pontos de apoio do cabo).

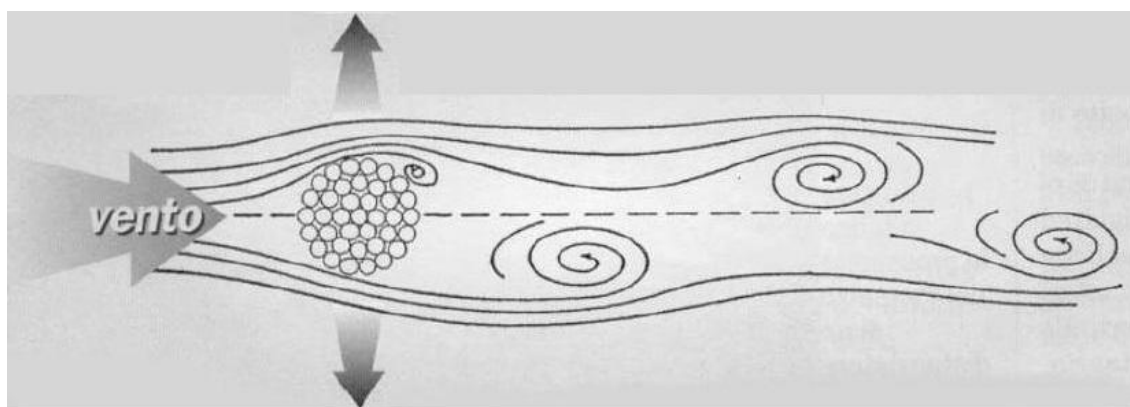


Figura 5.1 - Efeito da vibração eólica num cabo.

A amplitude (forma de onda na Figura 5.2) e frequência da vibração dependem da energia do vento - balanceada contra as características de auto-amortecimento do cabo a uma determinada tensão.

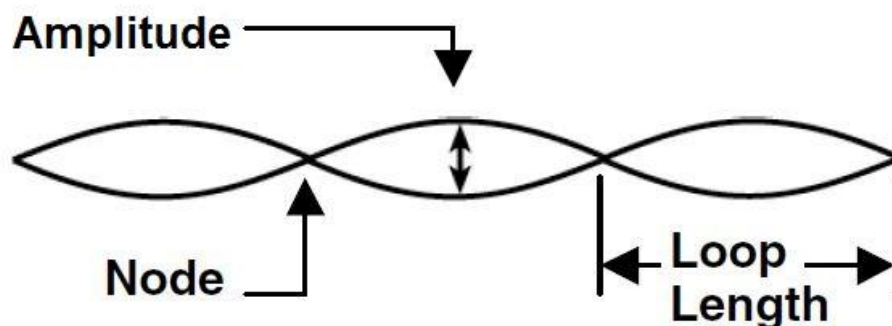


Figura 5.2 - Vibração induzida pelo vento.

A vibração eólica tipicamente assume valores entre os 8 e 60 Hz (para velocidades de vento típicas, entre 3 e 25 km/h), que ocorre, quase exclusivamente, na direção vertical e com o valor de amplitude, aproximadamente, igual ao diâmetro do cabo. A energia do vento cresce com o diâmetro e comprimento do cabo [22]. Condutores largos em vãos grandes recebem mais energia do que condutores mais pequenos em vãos mais curtos. O amortecimento das oscilações ou dissipação da energia pode ser feito de duas formas

- Pela característica natural de auto-amortecimento do condutor;
- Com a ajuda de aparelhos especiais (amortecedores), que podem ser colocados nas linhas, quando a característica de auto-amortecimento natural dos condutores é considerada insuficiente.



Figura 5.3 - Espaçador-amortecedor para linhas aéreas.

Deve entender-se que a existência de vibração eólica numa linha aérea não constitui necessariamente um problema. No entanto, se a magnitude da vibração for suficientemente elevada, danos sob a forma de abrasão ou fadiga poderão ocorrer ao longo de um período de tempo.

A abrasão é o desgaste da superfície de um condutor, está geralmente associada a ligações com folgas entre os condutores e outros dispositivos. As folgas que permitem a

abrasão são consequência, muitas vezes, de vibração eólica excessiva. Danos de abrasão podem ocorrer no troço de um vão, entre o cabo e espaçadores (Figura 5.4), espaçadores-amortecedores e esferas sinalizadoras ou nos apoios.



Figura 5.4 - Dano por abrasão num espaçador.

Falhas por fadiga são o resultado direto da flexão de um material uma certa quantidade de vezes ao longo de um suficiente número de ciclos (a remoção da anilha de uma lata é um exemplo fácil de entender de falha por fadiga de um material). Todos os materiais têm um limite de resistência à fadiga e quando esse limite é ultrapassado ocorrem falhas. No caso de condutores aéreos submetidos a vibrações eólicas a máxima flexão ocorre nos pontos onde o condutor está preso, sendo impedido de se mover. Tal situação ocorre na extremidade de braçadeiras, espaçadores e espaçadores-amortecedores. Quando as tensões de flexão, devido a vibração eólica, aplicadas num condutor excederem o limite da resistência falhas devido a fadiga ocorrerão. O tempo até a falha dependerá da magnitude das tensões de flexão e o número de ciclos de flexão acumulados.

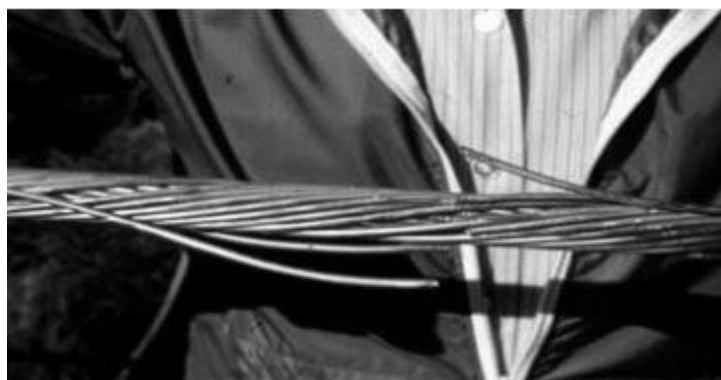


Figura 5.5 - Fadiga de fios condutores.

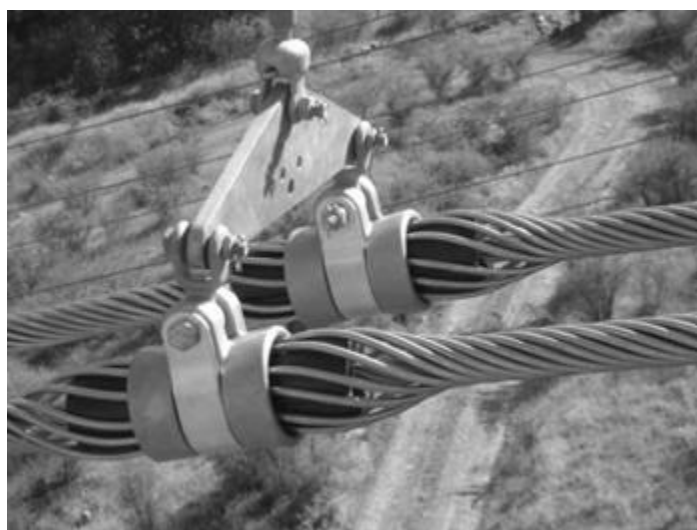
Existem duas diferenças significativas entre o cabo ACCC e os condutores convencionais em termos de auto-amortecimento das vibrações e resistência à fadiga. A performance de um condutor sob a influência de vibrações eólicas está relacionada com dois aspectos principais:

- a) A energia de vibração do vento remanescente que deve ser absorvida pelo cabo, que é dependente da energia total do vento e do auto-amortecimento do sistema condutor;
- b) A capacidade dos fios de alumínio absorverem a energia de vibração remanescente sem sofrerem danos por fadiga.

Testes efetuados a cabos ACSR e ACCC mostraram que, nas mesmas circunstâncias, o ACCC dissipa a energia de vibração de forma mais eficaz. Este facto deve-se em parte ao núcleo. É sabido que compósitos têm melhores propriedades de amortecimento [22]. Contudo ficou, também, evidente que maiores tensões aplicadas sobre o cabo dão origem a que o auto-amortecimento piorasse.

Embora haja fortes indícios de que as capacidades de auto-amortecimento natural dos condutores ACCC sejam muito boas, testes de auto-amortecimento não abordam necessariamente a questão da sobrevivência dos fios de alumínio contra os ciclos de vibração. Uma coisa é prever ou reconhecer a quantidade de vibração que um condutor vai exibir num determinado ambiente, mas é outra coisa prever a capacidade do material de sobreviver à ação.

Submetido a testes o cabo ACCC demonstrou uma ótima resistência a falhas devido a fadiga e quando suportado por pinças de suspensão do tipo ASG (*Armor Grip Suspension*) (Figura 5.6) não exibia nenhum sinal de falhas por fadiga.



**Figura 5.6** - Pinças de suspensão ASG.



## 5.4. Gelo

A formação de gelo nos condutores aéreos aumenta o seu peso e pode levar à sua quebra. Este aumento de peso afeta também a dimensão da flecha provocada pelo cabo: mais peso, flecha maior. A resistência e elasticidade do núcleo compósito levam a que o cabo ACCC corra um risco de quebrar muito menor. Estes dois fatores permitem que o cabo ao invés de ceder ao peso e quebrar alongue sem que haja danos. Contudo, este comportamento dá origem a flechas que podem violar os limites de segurança, mas se as estruturas que suportam os condutores permitirem é possível utilizar maiores tensões de amarração no cabo ACCC para atenuar a dimensão das flechas provocadas pelo peso do gelo. Este comportamento pode dar origem a situações complicadas; por exemplo, em 2010 um estudo concluiu que o cabo ACCC não era o ideal para o *up-rating* da rede de transmissão da Irlanda justamente porque o peso do gelo originava flechas que violavam os limites de segurança [3].

Outra situação que a formação de gelo origina trata-se do desprendimento do gelo na altura em que derrete - “efeito de chicote”. Contudo é muito raro que o gelo formado em torno do cabo num vão se desprenda todo ao mesmo tempo e o mais comum é que pequenos pedaços se desprendam durante um período de tempo e as vibrações que provocam são facilmente amortecidas pelo cabo. Se a linha se encontrar em zonas muito afetadas pela formação de gelo é aconselhável que a disposição dos condutores não os coloque na vertical para evitar que a queda de gelo dos condutores superiores caia nos que se encontram por baixo.



## Capítulo 6

### Comportamento Térmico

Quando um cabo é montado entre dois apoios a carga que o cabo experimenta é partilhada pelos dois materiais que o constituem. Contudo quando a corrente elétrica percorre o condutor o cabo aquece e a resposta dos dois materiais ao calor é diferente. Nos cabos convencionais este facto nunca levantou problema pois a gama de temperaturas em que os cabos operavam não eram significativas para alterar o comportamento dos materiais de forma a afetar os cálculos. Mas no caso do cabo ACCC devido à sua grande gama de temperaturas de operação é necessário ter em conta o ponto de joelho a partir do qual o alumínio deixa de contribuir para suportar a carga mecânica e de contribuir para o aumento da flecha provocada pelo cabo e somente o núcleo do cabo o faz.

Num cabo convencional os fios de alumínio e de aço partilham a carga mecânica do cabo e contribuem para o aumento da flecha ao longo de toda a sua faixa de temperaturas de operação (normalmente até 100°C no máximo). Com os dois materiais partilhando sempre a carga e dilatando em simultâneo não se torna necessário fazer alterações ao módulo de elasticidade (ou módulo de *Young*) ou ao coeficiente de dilatação usados nos cálculos. O comportamento do cabo será linear e mais fácil de tratar matematicamente sem que para isso haja perda de rigor nos resultados encontrados.

Num cabo ACCC tal não acontece. Com o aumento da temperatura a partilha de carga entre os dois materiais vai mudar, o alumínio vai contribuir cada vez menos e toda a carga passará a ser suportada pelo núcleo compósito a partir de uma determinada temperatura (ponto de joelho), temperatura a partir da qual o comportamento e o próprio coeficiente de dilatação do alumínio se alteram. Neste ponto levanta-se a questão: que temperatura deverá ser considerada para o ponto de joelho? O alumínio puro possui um coeficiente de dilatação térmica linear na faixa de 20°C a 100°C [23], contudo o alumínio usado destes cabos é alvo de tratamentos que alteram as suas propriedades. Este aspeto é muito importante, pois um erro ao considerar o valor da temperatura a que ocorre o ponto de joelho pode levar a resultados,

para o valor da flecha criada pelos cabos, de valor inferior ao que se irá verificar na realidade e daí resultarem consequências desagradáveis para a linha em que o cabo estiver inserido.

Para valores de temperatura superiores ao ponto de joelho só o compósito que constitui o núcleo do cabo aguentará toda a carga mecânica e contribui para o aumento da flecha. Em resultado um coeficiente de expansão térmica muito inferior passará a caracterizar o comportamento do cabo face ao aumento de temperatura o que quer dizer que a flecha não aumentará tanto como antes. A Figura 6.1 representa o comportamento dos cabos ACSR e ACCC face ao aumento de temperatura.

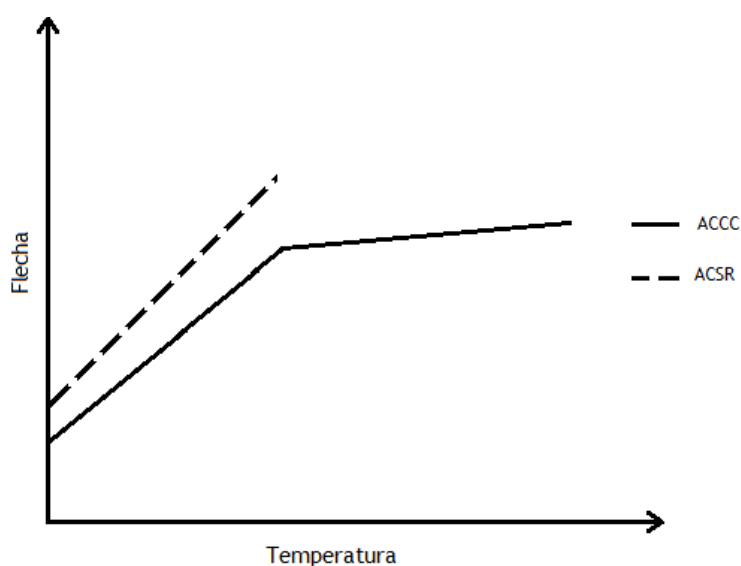


Figura 6.1 - Comportamento da flecha dos cabos face ao aumento da temperatura.

Este tipo de comportamento é novo e vem levantar alguns problemas no cálculo da flecha dos cabos na zona do ponto de joelho, particularmente na aplicação da equação dos estados que não pode ser aplicada tendo-se num estado as características do cabo abaixo do ponto de joelho e noutro estado as características acima do ponto de joelho. Seria como estar a usar dois cabos diferentes, um em cada estado e tal não é válido. Surge assim a questão: como fazer a transição de uma zona de operação, do cabo, para outra? Além disso o valor de temperatura onde ocorre o ponto de flecha não é exatamente conhecido, e pode alterar-se com o passar do tempo devido ao desgaste dos materiais, principalmente do alumínio: alongamento dos filamentos e deformações devido às cargas mecânicas que suporta e às variações de temperatura a que for sujeito fazem com que a contribuição do alumínio para suportar a carga mecânica decresça. Em resultado o ponto de joelho ocorrerá mais cedo num cabo já com algum tempo de funcionamento do que num cabo acabado de instalar.

Neste capítulo será estudado a influência do ponto de joelho na dimensão da flecha provocada pelo cabo ACCC, bem como averiguar os ganhos, em termos de distâncias, que se podem obter relativamente aos cabos convencionais. Serão também comparados os resultados dos cálculos teóricos com a realidade para se perceber a adequabilidade do método de

cálculo utilizado com o comportamento exibido pelo cabo. Para tal serão utilizados dois exemplos reais, que são as primeiras duas instalações em que o cabo ACCC foi utilizado em Portugal.

## 6.1 Método de cálculo

O método de cálculo utilizado para calcular as flechas dos cabos será a indicada no RSLEAT, assim como todos os coeficientes a adotar.

### 6.1.1. Tração máxima

Tendo em conta o artigo 24º do RSLEAT o máximo valor admissível é:

$$T_{seg} = \frac{T_R}{2,5} \quad (6.1)$$

Onde:

- $T_R$  - tensão de rutura;
- $T_{seg}$  - tensão máxima a que o cabo pode ser sujeito.

As trações máximas consideradas devem estar sempre abaixo deste valor.

### 6.1.2. Coeficientes de sobrecarga

Os diversos elementos duma linha, em particular os seus condutores, sofrem solicitações originadas tanto pela força do vento que nelas incide, formação de manga de gelo ao longo dos seus condutores, como também devido às variações da sua temperatura. Estes fatores variam com as características da região de implantação da linha e, principalmente, de acordo com as estações do ano. Neste âmbito são definidos três estados atmosféricos tipo, que pretendem caracterizar as circunstâncias mais desfavoráveis:

- **Estado de Inverno:** estado caracterizado pela menor temperatura previsível para a região onde a linha se vai implantar, possibilidade de existência de manga de gelo e existência de vento reduzido;
- **Estado de Primavera:** estado caracterizado por vento máximo, temperatura média previsível para a região de implantação da linha e ausência de manga de gelo;

- **Estado de Verão:** também designado por estado de flecha máxima, estado atmosférico caracterizado pela temperatura máxima previsível para a região de implantação e ausência de vento e manga de gelo nos condutores.

#### 6.1.2.1. Força do vento

Obedecendo ao disposto no artigo nº 10 do RSLEAT, no cálculo das linhas aéreas, o vento deverá considerar-se atuando numa direção horizontal e a sua força de ação será paralela a esta direção. O artigo nº 10 define a expressão de cálculo da força proveniente da ação do vento:

$$F_v = \alpha . c . q . s \quad (6.2)$$

Onde:

- $F_v$  - força proveniente da ação do vento;
- $\alpha$  - coeficiente de redução;
- $c$  - coeficiente de forma;
- $q$  - pressão dinâmica do vento;
- $s$  - área da superfície batida pelo vento.

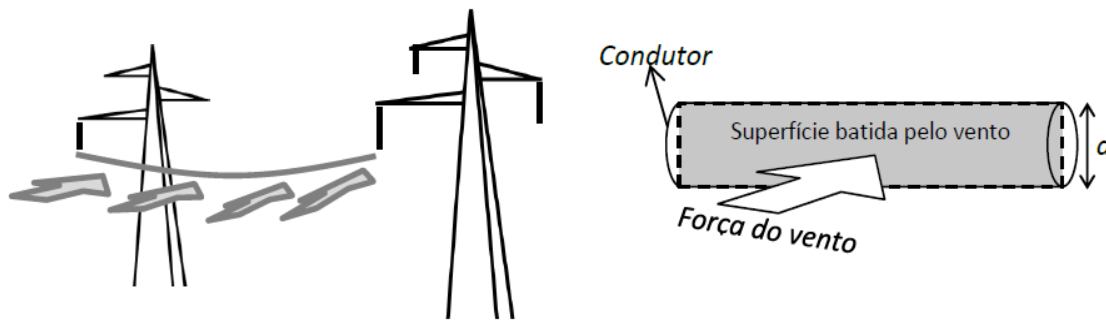


Figura 6.2 - Força do vento numa direção horizontal ao condutor.

Os valores da pressão dinâmica do vento, em função da altura acima do solo a que se encontra o elemento da linha sobre o qual se pretende calcular a ação do vento, serão, para os escalões de altura que se consideram os indicados na tabela seguinte:

Tabela 6.1 - Valores da pressão dinâmica do vento.

Altura acima do solo (m)	Pressão dinâmica, “q” (Pa)	
	Vento máximo habitual	Vento reduzido
Até 30	750	300
De 30 a 50	900	360
Acima de 50	1050	420

Os valores do coeficiente de forma serão:

Tabela 6.2 - Valores para o coeficiente de forma.

	Diâmetro (mm)	Coeficiente de forma “c”
Condutores nus e cabos de guarda	Até 12,5	1,2
	Entre 12,5 e 15,8	1,1
	Acima 15,8	1,0
Cabos isolados em feixe (troçada)		1,3
Cabos auto-suportados e cabos tipo 8		1,8
Isoladores		1,0

Segundo o RSLEAT, os valores a adotar para o coeficiente de redução serão:

Tabela 6.3 - Valores para o coeficiente de redução.

Elemento	Valor do coeficiente de redução “α”
Condutores Cabos de guarda	0,6
Apoios Travessas Isoladores	1

#### 6.1.2.2. Ação do gelo

Na Figura 6.3 encontra-se representado o corte transversal da configuração mais provável na manga de gelo no condutor. Note-se que a deposição da manga de gelo não é uniforme nem simétrica.

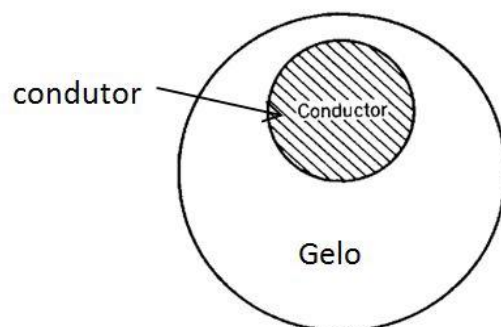


Figura 6.3 - Corte transversal da configuração mais provável do gelo no condutor.

Contudo, assume-se uma configuração simétrica para a deposição da manga de gelo no condutor, representada na Figura 6.4.

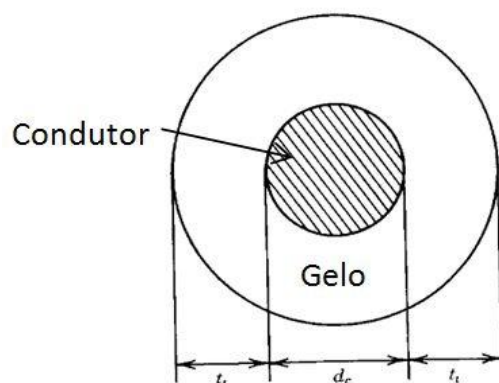


Figura 6.4 - Configuração assumida para a deposição da manga de gelo no condutor.

Nas recomendações do artigo nº 16 do RSLEAT caracteriza-se como zona de gelo as regiões de altitude superior a 700m. O artigo referido, informa que a manga de gelo a considerar no cálculo dos condutores e dos cabos de guarda das linhas aéreas deverá ter uma espessura uniforme de pelo menos 10 mm e uma densidade de 0,9 kg/dm<sup>3</sup>.

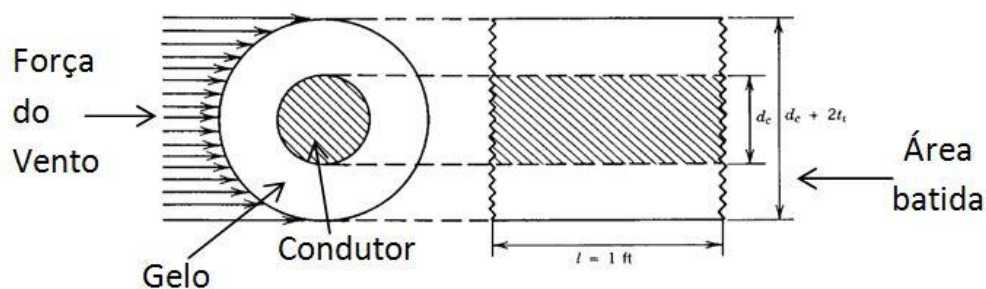


Figura 6.5 - Secção vista pelo vento quando a manga de gelo está depositada no condutor.



### 6.1.2.3. Cálculo dos coeficientes de sobrecarga

A consideração dos agentes atmosféricos no estudo do comportamento mecânico dos condutores das linhas é feita através do coeficiente de sobrecarga. Este coeficiente traduz a ação do vento e do gelo pelo agravamento do peso próprio dos condutores. Desta forma o coeficiente de sobrecarga permite comparar os estados Primavera e Inverno quanto aos esforços que exercem sobre os apoios.

Para calcular os coeficientes de sobrecarga para o estado de Primavera e Inverno é necessário conhecer os valores da força do vento para as duas situações, a espessura e densidade do gelo considerada para o estado de Inverno e o peso próprio e diâmetro da linha.

O cálculo do coeficiente de sobrecarga é dado pela seguinte expressão:

$$m = \frac{\sqrt{(\omega + \rho_{\text{gelo}} \cdot \frac{\pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2])^2 + F_v^2}}{\omega} \quad (6.3)$$

Onde:

m - coeficiente de sobrecarga

$\omega$  - peso próprio do condutor

$\rho_{\text{gelo}}$  - peso volumétrico do gelo

d - diâmetro do condutor

e - espessura do gelo

$F_v$  - força proveniente da ação do vento

### 6.1.3. Determinação do vão crítico

O vão crítico é o vão relativo a uma dada tensão máxima, para a qual os condutores ficam sujeitos a essa mesma tensão em ambos os estados de inverno e de primavera.

O interesse no cálculo do vão crítico, resulta da possível necessidade deste valor para determinar qual o estado mais desfavorável, o de Inverno ou de Primavera, como se verá mais á frente neste documento.

O vão crítico é dado pela seguinte expressão:

$$L_{cr} = \frac{\sigma \cdot t_{max}}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha_d \cdot (\theta_{Primavera} - \theta_{Inverno})}{m_{Primavera}^2 - m_{Inverno}^2}} \quad (6.4)$$

Onde:

- $L_{cr}$  - comprimento do vão crítico
- $\sigma$  - secção do condutor
- $t_{max}$  - tensão de segurança máxima
- $\omega$  - peso próprio do condutor
- $\alpha_d$  - coeficiente de dilatação térmica
- $\theta_{Primavera}$  - temperatura na Primavera
- $\theta_{Inverno}$  - temperatura no Inverno
- $m_{Primavera}$  - coeficiente de sobrecarga para a Primavera
- $m_{Inverno}$  - coeficiente de sobrecarga para o Inverno

#### 6.1.4. Determinação do estado mais desfavorável

Para a determinação do estado mais desfavorável é necessário ter em conta os valores dos coeficientes de sobrecarga. A determinação do estado mais desfavorável e da necessidade, ou não, de calcular o vão, bem como a sua natureza: crítico, infinito ou imaginário é feita recorrendo ao diagrama representado na Figura 6.6.

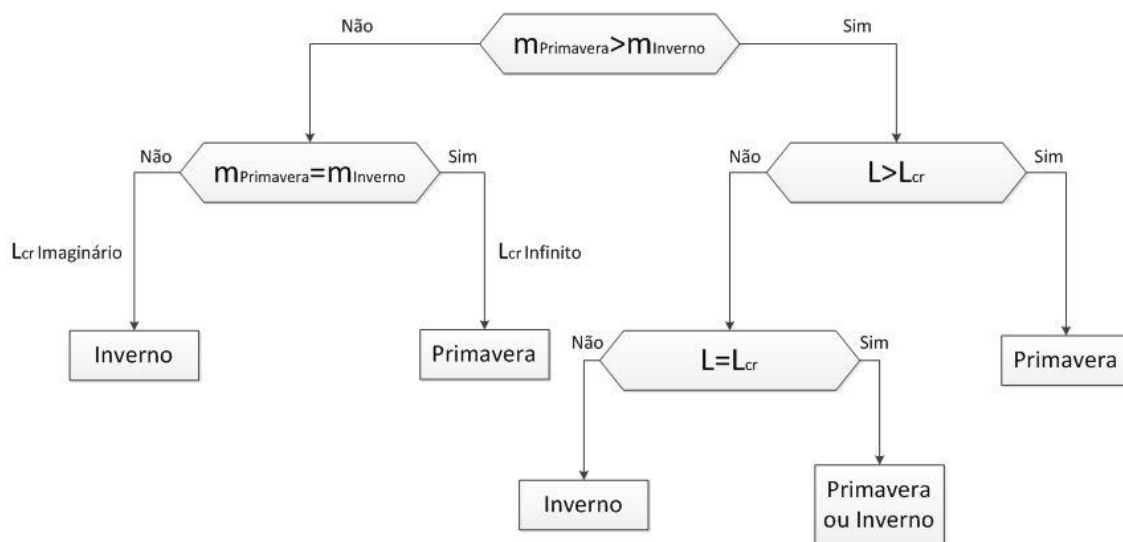


Figura 6.6 - Diagrama de Verificação do Estado Mais Desfavorável.

#### 6.1.5. Equação dos estados

A equação dos estados é uma equação de equilíbrio mecânico que relaciona a tensão mecânica nos condutores de uma linha aérea, num determinado estado atmosférico a partir

da tensão existente nos condutores num estado atmosférico conhecido, conhecendo o comprimento do vão e as características mecânicas dos condutores.

A equação dos estados tem a seguinte forma:

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_i \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2} \quad (6.5)$$

Onde:

- $\theta_{i,k}$  - temperatura no estado i, k;
- $t_{i,k}$  - tensão no estado i, k;
- $\alpha_d$  - coeficiente de dilatação térmica;
- E - módulo de elasticidade ou módulo de Young;
- $m_{i,k}$  - coeficiente de sobrecarga do estado i, k;
- $\omega$  - peso próprio do condutor;
- L - comprimento do vão;
- $\sigma$  - secção do condutor.

#### 6.1.6. Cálculo da flecha

Após obtida a tensão mínima, que corresponde à flecha máxima, para os estados desejados é possível calcular a flecha através da fórmula:

$$Flecha = \frac{L^2 \cdot \omega}{8 \cdot \sigma \cdot t} \quad (6.6)$$

Onde:

- L - comprimento do vão;
- $\omega$  - peso próprio do condutor;
- $\sigma$  - secção do condutor;
- t - tensão.

Esta equação aplica-se para vãos em patamares, ou seja, vãos ao mesmo nível. Caso se esteja a tratar de vão em declive a equação a aplicar seria outra. Como nas linhas que serão estudadas os vãos estão ao mesmo nível, não será apresentada a equação para vãos em declive, pois não será necessária.

O valor da flecha é obtido em metros (m).

## 6.2. Caso de estudo 1 - Alfena

O caso que será abordado nesta secção trata-se da primeira linha que foi equipada com o cabo ACCC em Portugal. Localizada na freguesia de Alfena, concelho de Valongo a linha em causa necessitava de um aumento da capacidade de transporte. A solução inicial era a construção de uma nova linha em paralelo com a linha existente, mas depois surgiu a opção de usar o cabo ACCC para substituir os condutores, sem que nenhuma intervenção com vista a reforçar os apoios fosse realizada, opção esta que acabou por ser a escolhida. Para além de conseguido o objetivo pretendido também se conseguiu uma redução da dimensão das flechas em cada vão da linha que será analisada nesta secção.

A linha em questão é constituída por quatro vãos com comprimentos de 287m, 171m, 181 e 21m. Aquando da escolha do cabo surgiu a questão de como realizar os cálculos da flecha, devido ao comportamento que eles exibem. A pedido da EDP o fabricante do cabo forneceu os resultados obtidos para a dimensão da flecha, tanto para o novo cabo como para o cabo que estava a ser substituído. Os resultados obtidos, para o novo cabo, por parte da EDP nunca coincidiram com os do fabricante e mesmo os referentes ao cabo convencional também apresentavam diferenças nos valores obtidos, mesmo não levantando estes problemas no cálculo.

Nesta secção são realizados os cálculos das flechas para ambos os cabos. No caso do cabo ACCC foi utilizada uma modificação ao método de cálculo, na aplicação da equação dos estados, para lidar com o problema criado pelo ponto de joelho. Os resultados obtidos serão comparados com os resultados fornecidos pelo fabricante do cabo e pela EDP, também serão comparadas as flechas criadas por ambos os cabos para ser possível obter uma melhor percepção de quanto é possível reduzir na dimensão das flechas ao utilizar o cabo ACCC. Dado que o valor em que ocorre o ponto de flecha não é exatamente conhecido e pode variar ao longo do período de vida de em cabo foram realizados cálculos para a flecha do cabo ACCC considerando três temperaturas para o ponto de flecha, 80°C, 90°C e 100°C, para ser possível analisar que diferenças se verificam dependendo da temperatura em que ocorre o ponto de joelho.

### 6.2.1. Abordagem

A sequência de cálculos efetuados para obter a flecha dos condutores nas temperaturas desejadas foi a mesma que a utilizada para os cabos convencionais:

1. Cálculo da tração máxima;
2. Cálculo da força do vento;
3. Cálculo dos coeficientes de sobrecarga da Primavera e do Inverno;
4. Determinação do estado mais desfavorável;
5. Determinação da tensão mecânica no estado pretendido através da equação dos estados;
6. Determinação da flecha.

A diferença nos cálculos realizados para o cabo ACCC em relação aos cálculos realizados para o cabo ACSR encontra-se na aplicação da equação dos estados, como já foi mencionado.

Utilizando um cabo ACSR a utilização da equação dos estados é bastante simples: conhecendo o estado mais desfavorável e a sua temperatura e assumindo que a tração mecânica que o cabo experiencia nesse estado é a tração máxima é possível saber qual tração afetará o cabo em qualquer outro estado, utilizando para isso a temperatura que afetará o cabo nesse estado. É possível fazer isto para toda a gama de temperaturas de operação do cabo, porque, como já foi dito, a gama de temperaturas em que este cabo opera não ultrapassa o valor a partir do qual o comportamento do alumínio se modifica.

Já no cabo ACCC não é possível utilizar esta abordagem livremente, o ponto de Joelho inviabiliza os resultados daí obtidos. A equação dos estados não é válida se num membro da equação estiver um estado pré ponto de Joelho e, noutro membro, um estado pós ponto de Joelho, o coeficiente de dilatação e o módulo de *Young* que caracterizam o cabo são diferentes em ambas as zonas. A solução adotada, neste estudo, para contornar este problema da descontinuidade do comportamento do cabo foi:

- A tensão mecânica em estados caracterizados por temperaturas inferiores à considerada como ponto de Joelho, inclusive, foi determinada a partir da tensão existente no estado mais desfavorável, aplicando-se as características do cabo (módulo de *Young* e coeficiente de dilatação térmica) referentes às temperaturas abaixo do ponto de Joelho;
- A tensão mecânica em estados caracterizados por temperaturas superiores à considerada como ponto de Joelho foi determinada a partir da tensão no ponto de Joelho, aplicando-se as características do cabo (módulo de *Young* e coeficiente de dilatação térmica) referentes às temperaturas acima do ponto de Joelho. Por outras palavras, o ponto de Joelho substituiu o estado mais desfavorável na aplicação da equação dos estados.

Uma vez obtidas as tensões mecânicas do cabo em cada estado de temperatura desejado é possível calcular as flechas que o cabo formará quando funcionar a determinada temperatura.

Três situações serão analisadas:

- Comparação entre a dimensão das flechas criadas pelo cabo ACCC, considerando três pontos de Joelho diferentes (80°C, 90°C e 100°C);
- Comparação entre os resultados obtidos com os resultados fornecidos pelo fabricante e com os resultados fornecidos pela EDP;
- Comparação entre a dimensão das flechas criadas pelos cabos ACSR e ACCC.

### 6.2.2. Dados do problema

Os dados presentes na Tabela 6.4 e Tabela 6.5 foram obtidos através das folhas de características dos cabos presentes no Anexo 1: Características dos cabos.

Tabela 6.4 - Características do cabo ACSR utilizado.

Secção (mm <sup>2</sup> )	326,58
Secção do alumínio (mm <sup>2</sup> )	264
Diâmetro (mm)	23,47
Peso próprio (daN/m)	1,219
Módulo de <i>Young</i> (daN/mm <sup>2</sup> )	7850
Tensão de rutura (daN)	11270
Coeficiente de dilatação (°C <sup>-1</sup> )	0,0000177

Tabela 6.5 - Características do cabo ACCC utilizado.

Secção (mm <sup>2</sup> )	408,6
Secção do alumínio (mm <sup>2</sup> )	361
Diâmetro (mm)	23,55
Peso próprio (daN/m)	1,084
Módulo de <i>Young</i> abaixo do ponto de Joelho (daN/mm <sup>2</sup> )	6090
Módulo de <i>Young</i> acima do ponto de Joelho (daN/mm <sup>2</sup> )	11230
Tensão de rutura (daN)	12230
Coeficiente de dilatação abaixo do ponto de Joelho (°C <sup>-1</sup> )	0,0000185
Coeficiente de dilatação acima do ponto de Joelho (°C <sup>-1</sup> )	0,00000161

O valor da pressão dinâmica do vento será de 900 Pa na Primavera e de 360 Pa no Inverno.

Estando-se a tratar de condutores nus com diâmetro superior a 15,8 mm o coeficiente forma terá o valor 1.

O valor do coeficiente de redução será 0,6, valor usado para condutores e cabos de guarda.

Sendo a zona de Alfena considerada uma zona onde não ocorre a formação de gelo as temperaturas a considerar serão de 15°C na Primavera e de -5°C no Inverno.

Para a tração máxima a considerar o valor adotado foi de 5 daN/mm<sup>2</sup>, para os três maiores vãos (287 m, 171 m e 181 m) e de 1,53 daN/mm<sup>2</sup> para o menor vão (21 m) pois eram estes os valores aplicados ao cabo ACSR. Só assim é possível comparar os resultados obtidos para ambos os cabos.

### 6.2.3. Resultados

#### 6.2.3.1. Tração máxima

Usando a equação (6.1) calcula-se a tração máxima que cada cabo pode suportar.

Os valores obtidos para a tração máxima admissível por cada cabo são apresentados na Tabela 6.6.

**Tabela 6.6** - Valores obtidos para a tração máxima admissível dos cabos.

Cabo	Tração máxima (daN)	Tração máxima (daN/mm <sup>2</sup> )
ACSR	4508	13,804
ACCC	4892	11,973

Como foi referido o valor adotado para a tração máxima será de 5 daN/mm<sup>2</sup> e de 1,53 daN/mm<sup>2</sup>. Sendo os valores obtidos muito inferiores aos valores máximos que cada cabo pode suportar não se levantam problemas de segurança.

#### 6.2.3.2. Força do vento

Com a equação (6.2) foi calculada a força do vento que os cabos experimentam nos estados de Primavera e Inverno.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Valores da força do vento.

Estado	Cabo	Força do vento (daN/m)
Primavera	ACSR	1,267
	ACCC	1,271
Inverno	ACSR	0,507
	ACCC	0,508

A força do vento que afeta ambos os cabos é quase do mesmo valor, sendo ligeiramente superior no caso do cabo ACCC. Tal ocorrência deve-se ao facto da área batida pelo vento dos cabos ser muito semelhante, mas sendo a secção do cabo ACCC ligeiramente superior origina uma área batida pelo vento maior, daí a força do vento que atinge o cabo ACCC ser ligeiramente superior à que atinge o cabo ACSR.

### 6.2.3.3. Coeficientes de sobrecarga

Como, neste caso, não existe a ação do gelo o cálculo dos coeficientes de sobrecarga torna-se bastante mais simples. Os coeficientes de sobrecarga foram calculados usando a equação (6.3) e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Coeficientes de sobrecarga.

Estado	Cabo	Coeficientes de sobrecarga
Primavera	ACSR	1,442
	ACCC	1,518
Inverno	ACSR	1,083
	ACCC	1,099

### 6.2.3.4. Vão Crítico

Aplicando a equação (6.4) calculou-se o vão crítico. Neste caso existirão dois vãos críticos devido às duas tensões máximas consideradas, um referente aos vãos de 287 m, 171 m e 181 m e outro referente ao vão de 21 m.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.9 e na Tabela 6.10 - Resultados obtidos para o vão crítico utilizando o cabo ACSR..



**Tabela 6.9** - Resultados obtidos para o vão crítico utilizando o cabo ACCC.

Vão (m)	Vão Crítico (m)
287	165,177
171	
181	
21	50,544

**Tabela 6.10** - Resultados obtidos para o vão crítico utilizando o cabo ACSR.

Vão (m)	Vão Crítico (m)
287	129,574
171	
181	
21	39,650

#### 6.2.3.5. Estado mais desfavorável

Através do diagrama da Figura 6.6, e tendo em conta os valores obtidos para os coeficientes de sobrecarga e para o vão crítico, é possível determinar o estado mais desfavorável.

Em ambos os cabos o estado mais desfavorável coincide em cada vão. Os estados mais desfavoráveis para cada vão são apresentados na Tabela 6.11.

**Tabela 6.11** - Estado mais desfavorável de cada vão da linha.

Vão (m)	Estado mais desfavorável
287	Primavera
171	
181	
21	Inverno

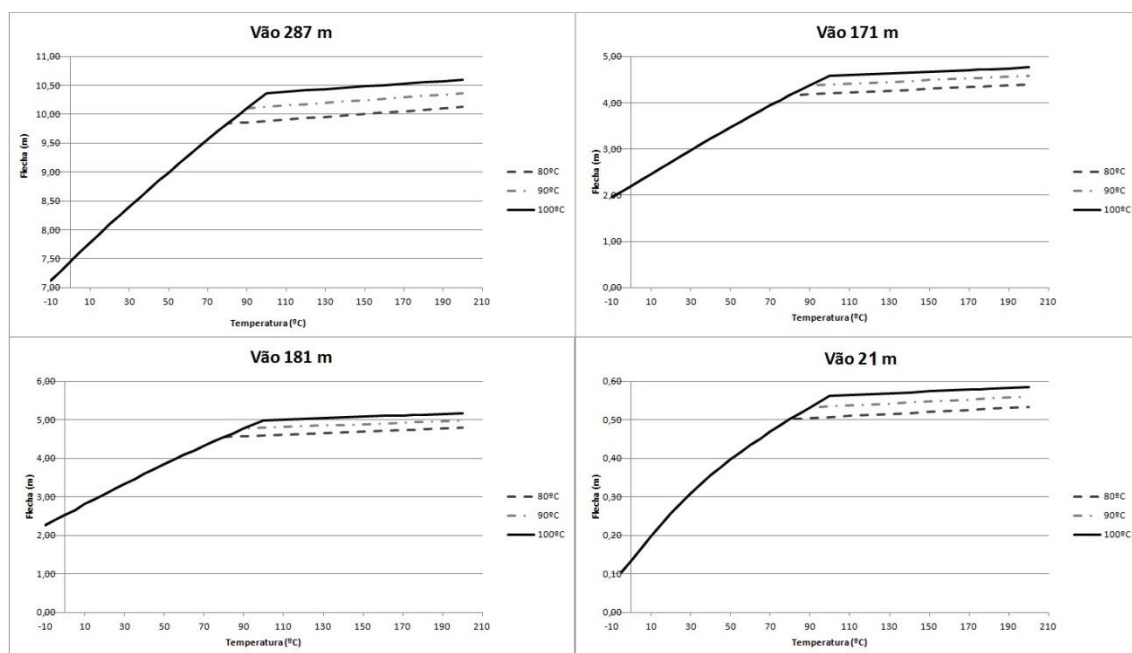
#### 6.2.3.6. Flechas

Após obtido o estado mais desfavorável é possível calcular a tensão mecânica em cada estado de temperatura pretendido e para cada um desses valores a flecha que os cabos exibirão. Como neste estudo o objetivo é a análise das flechas os valores das tensões mecânicas não serão apresentados, mas podem ser consultados nos Anexos 2, 3 e 4. Serão apresentados gráficos que traduzem a variação da dimensão da flecha provocada pelos cabos

em diferentes estados de temperatura dentro do seu intervalo de temperaturas de funcionamento.

### ➤ PONTO DE JOELHO

Aplicando a abordagem atrás explicada foram calculados os valores das flechas provocadas pelo cabo ACCC na linha em questão. Os valores obtidos considerando os três pontos de joelho a temperaturas diferentes, 80°C, 90°C e 100°C, são representadas no Figura 6.7.



**Figura 6.7** - Flecha criada pelo cabo ACCC considerando diferentes temperaturas para o ponto de joelho.

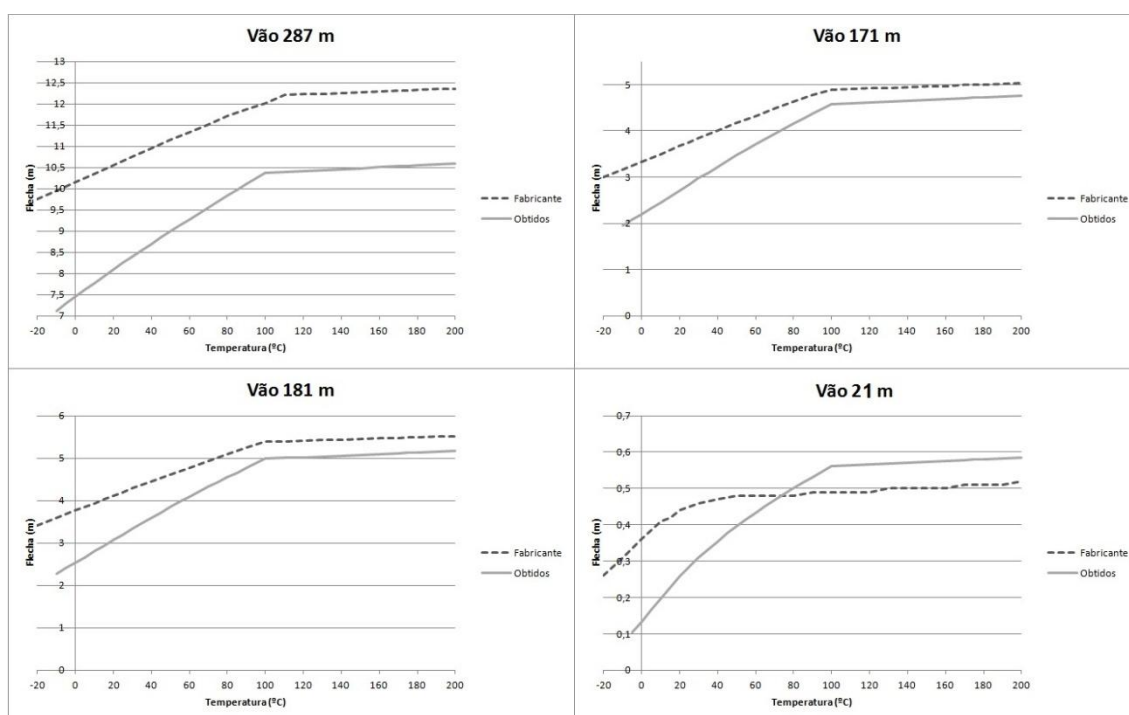
Pela observação dos gráficos da Figura 6.7 é fácil perceber qual a influência do ponto de joelho na dimensão da flecha provocada por um cabo. Como já foi explicado após o ponto de joelho só o compósito do núcleo do cabo contribuiu para o aumento da flecha e devido ao seu pequeno coeficiente de expansão térmica o aumento da flecha será menor. Este comportamento faz com que quanto mais cedo se der o ponto de joelho, mais cedo o aumento da flecha será atenuado e dará origem a flechas menores. Vejam-se alguns valores do gráfico referente ao vão de 287 metros: para a temperatura de 180°C a dimensão da flecha será 10,55m quando o ponto de flecha ocorrer ao 100°C, enquanto com o ponto de flecha a 80°C a flecha terá uma dimensão de 10,08m e este comportamento verifica-se nos restantes vãos.

O valor do ponto de joelho varia com o tipo de condutor, a tensão mecânica, comprimento do vão e idade do condutor, já que gelo, tempo frio e rajadas de vento (condições que provocam tensões mecânicas elevadas) esticam os fios de alumínio, que permite subsequentemente relaxar (reduzir as solicitações) e passar toda a carga para o núcleo. Assim sendo será interessante desenvolver formas de provocar o ponto de joelho a temperaturas inferiores às quais normalmente aconteceria. Submeter o alumínio a tensões antes de montar os cabos nos apoios pode ser uma solução, já que depois de submetido a solicitações mecânicas o alumínio deixará de contribuir para suportar a carga mecânica mais cedo e ao mesmo tempo deixará de contribuir para o aumento da flecha.

Como se verificou que o caso mais desfavorável para as dimensões das flechas originadas pelo cabo ACCC se verifica quando o ponto de joelho ocorre a 100°C, para os estudos comparativos serão estes os resultados usados.

### ➤ COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

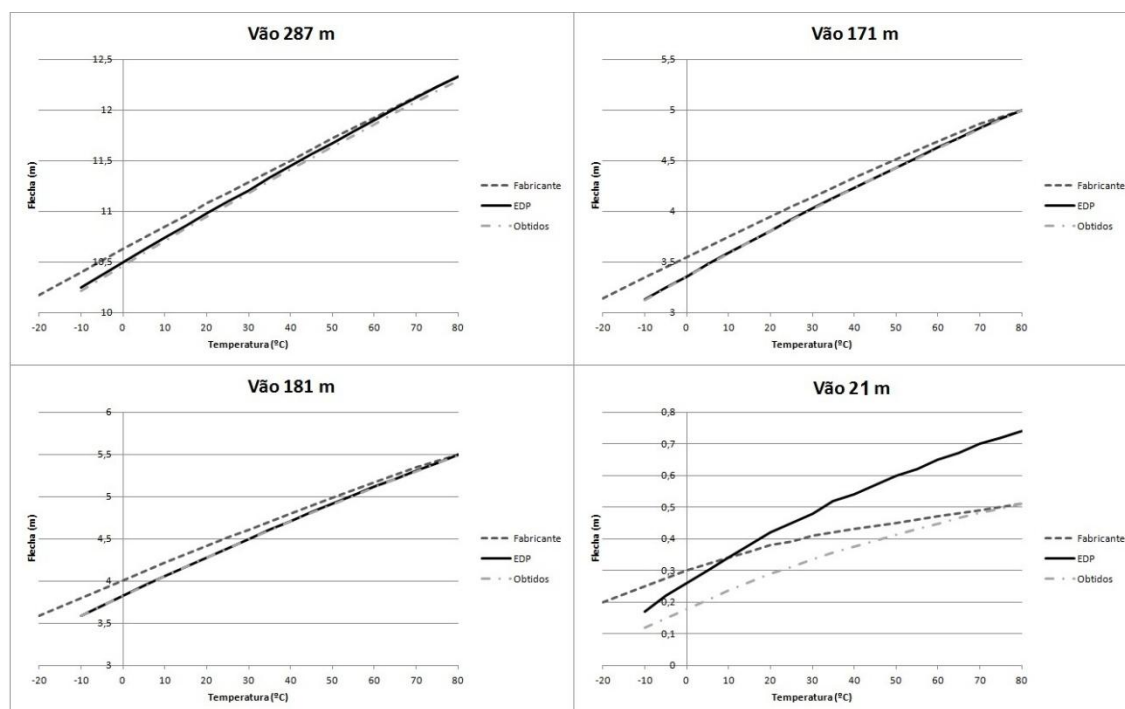
Para validação da abordagem utilizada no cálculo das flechas do cabo ACCC os valores obtidos foram comparados com os valores fornecidos pelo fabricante.



**Figura 6.8** - Valores das flechas obtidos, para o cabo ACCC, comparativamente aos resultados fornecidos pelo fabricante.

Observando os gráficos da Figura 6.8 constata-se que os resultados obtidos não coincidem com os resultados fornecidos pelo fabricante, sendo que a diferença é mais notória quanto

maior for o vão em análise. Contudo também os valores referentes ao cabo ACSR não são totalmente coincidentes.



**Figura 6.9** - Valores das flechas obtidos, para o cabo ACSR, comparativamente aos resultados fornecidos pelo fabricante e pela EDP<sup>6</sup>.

Apesar de a diferença não ser tão grande, continua-se a verificar. Esta diferença poderá dever-se ao método de cálculo utilizado já que o fabricante recomenda que estes cálculos se façam utilizando o método EPE (*Experimental Plastic Elongation*) em certos *softwares* de planeamento. O método EPE modela os condutores como “molas” com comportamento não-linear que alongam elasticamente em função da tensão, plasticamente em função da tensão e do tempo e termicamente em função da temperatura. O alongamento de cada componente (neste caso compósito e alumínio) é calculado separadamente. O alongamento do condutor é calculado para uma série de eventos de carga ao longo do tempo de vida da linha.

A diferença de métodos utilizados somado ao facto de o comportamento do cabo ACCC levantar algumas incógnitas estará na origem da maior discrepância nos valores das flechas, ao passo que para o cabo ACSR, cujo conhecimento dele e a experiência usando-o são vastíssimos, apesar de os resultados também não serem iguais, a diferença entre eles é menor.

Comparando os valores obtidos com os resultados da EDP é perceptível que coincidem, salvo alguns desvios provenientes de arredondamentos, o que serve para reforçar a conclusão

<sup>6</sup> Os resultados do fabricante não são do fabricante do cabo ACSR, mas sim do fabricante do cabo ACCC. Foram fornecidos a pedido da EDP.

de que as diferenças para com os valores fornecidos pelo fabricante provêm, principalmente, da diferença de métodos utilizados, agravados, no caso do cabo ACCC, pela dificuldade da modelização do seu comportamento não linear.

Apesar de tudo a veracidade de quaisquer resultados só poderá ser comprovada através do monitoramento dos cabos em funcionamento e dado que a instalação deste cabo em troços de linhas foi feita recentemente ainda não é possível ter um histórico do seu comportamento que permita tirar conclusões sólidas.

### ➤ ACCC vs. ACSR

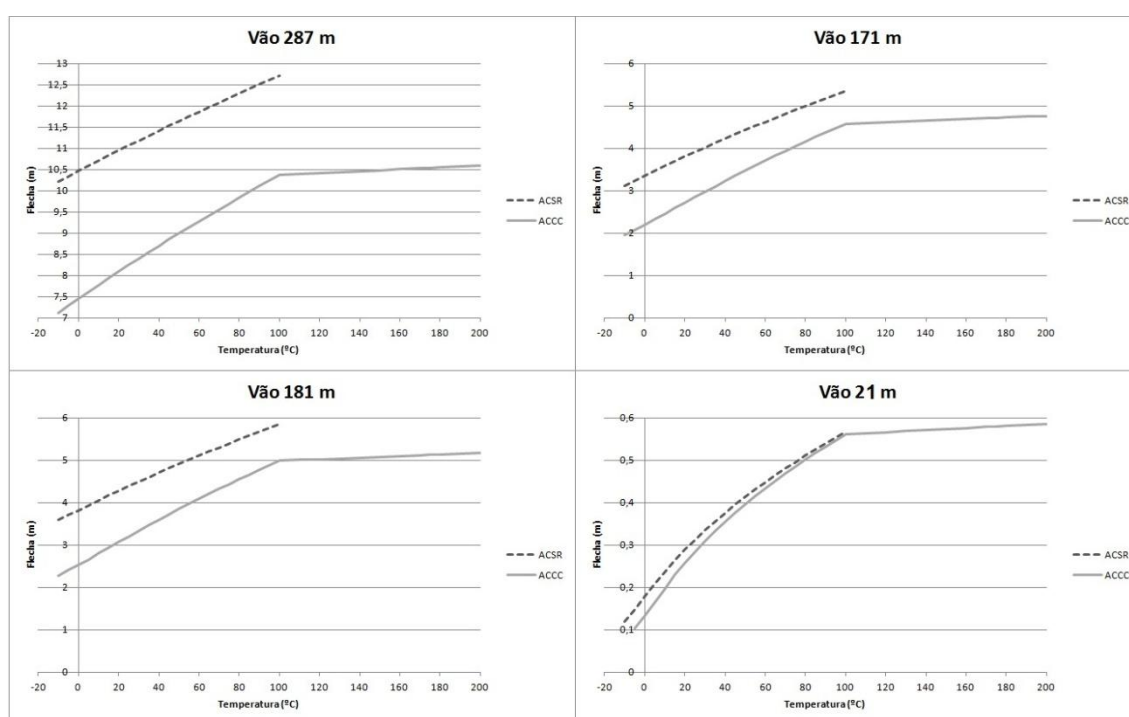


Figura 6.10 - Comparação entre as flechas dos cabos ACSR e ACCC.

Quando se analisa as flechas previstas para ambos os cabos é óbvio o ganho que se obteve com a substituição do cabo ACSR pelo ACCC, confirmando o que foi dito anteriormente sobre este aspeto. No maior vão, de 287m, esse facto é mais evidente onde, para uma temperatura de 100°C, que no caso do cabo ACSR só pode ser atingida por curtos períodos de tempo, a flecha provocado pelo cabo ACCC é 2,35 m menor que a flecha provocada pelo cabo ACSR.

### 6.3. Caso de estudo 2 - Figueira da Foz

A segunda linha, em Portugal, a ser equipada com o cabo ACCC encontra-se na Figueira da Foz. O porto da cidade foi alvo de uma expansão que permitiria aos navios atracarem mais a montante da foz do rio Mondego. Porém após a intervenção constatou-se que existia uma linha de 60kV que impedia os navios maiores de acederem às instalações do porto devido ao comprimento da flecha que criava entre as margens do rio. A solução foi substituir o cabo existente na travessia do rio pelo cabo ACCC. Em adição à substituição do cabo também foi instalado um apoio mais alto numa das margens. Estas duas intervenções permitiram uma diminuição da dimensão da flecha em, aproximadamente, 11 metros num vão de 461 metros de comprimento possibilitando assim o acesso de grandes navios ao cais e o normal funcionamento do porto da Figueira da Foz. Neste caso o propósito da aplicação do cabo ACCC foi a diminuição da flecha e não a elevada capacidade de transporte que permite, pois apenas o troço da linha correspondente à travessia do rio Mondego foi alvo desta intervenção, o troço restante continua equipado com o cabo convencional que limita a capacidade de transporte pelos seus limites inferiores. Após a instalação do cabo foi também instalado o local uma estação de monitorização da flecha deste.



Figura 6.11 - Cabo ACCC instalado na Figueira da Foz (olhando atentamente, está em frente à ponte)

Nesta secção serão efetuados os cálculos para o vão da linha equipado com o cabo ACCC e comparar os resultados com as medições obtidas para verificar se os cálculos verdadeiramente traduzem a realidade e, assim sendo, se se adequam ao comportamento que o cabo ACCC realmente exige.

### 6.3.1. Abordagem

A abordagem utilizada neste caso foi a mesma que no caso anterior, seja na metodologia utilizada como na solução adotada para o comportamento do cabo ACCC aquando da aplicação da equação dos estados. Neste caso não se realizaram cálculos para o condutor que foi substituído pelo ACCC visto que o objetivo não era a comparação entre ambos, mas sim a comparação dos valores obtidos com medições efetuadas no local da dimensão da flecha criada pelo cabo.

### 6.3.2. Dados do problema

O cabo utilizado na Figueira da Foz foi o ACCC Amsterdam, as suas propriedades mais relevantes para os cálculos realizados encontram-se na Tabela 6.12. as restantes características do cabo podem ser consultadas no Anexo 1: Características dos cabos.

**Tabela 6.12** - Características do cabo ACCC utilizado.

<b>Secção (mm<sup>2</sup>)</b>	383,7
<b>Secção do alumínio (mm<sup>2</sup>)</b>	371,3
<b>Diâmetro (mm)</b>	23,55
<b>Peso próprio (daN/m)</b>	1,1125
<b>Módulo de <i>Young</i> abaixo do ponto de joelho (daN/mm<sup>2</sup>)</b>	6290
<b>Módulo de <i>Young</i> acima do ponto de joelho (daN/mm<sup>2</sup>)</b>	11230
<b>Tensão de rutura (daN)</b>	12260
<b>Coeficiente de dilatação abaixo do ponto de joelho (°C<sup>-1</sup>)</b>	0,0000187
<b>Coeficiente de dilatação acima do ponto de joelho (°C<sup>-1</sup>)</b>	0,00000161

No contexto dos cálculos a realizar a zona da Figueira da Foz é em tudo semelhante à de Alfena e por isso muitos dos valores a adotar para os coeficientes presentes nas equações a usar são iguais.

O valor da pressão dinâmica do vento será de 900 Pa na Primavera e de 360 Pa no Inverno.

Estando-se a tratar de condutores nus com diâmetro superior a 15,8 mm o coeficiente forma terá o valor 1.

O valor do coeficiente de redução será 0,6, valor usado para condutores e cabos de guarda.

Sendo a zona da Figueira da Foz considerada uma zona onde não ocorre a formação de gelo as temperaturas a considerar serão de 15°C na Primavera e de -5°C no Inverno.

Para a tração máxima a considerar o valor adotado foi de 12 daN/mm<sup>2</sup>.

### 6.3.3. Resolução

#### 6.3.3.1. Tração máxima

Usando a equação (6.1) calcula-se a tração máxima que cada cabo pode suportar.

Os valores obtidos para a tração máxima admissível por cada cabo são apresentados na Tabela 6.13.

**Tabela 6.13** - Valores obtidos para a tração máxima admissível dos cabos.

Cabo	Tração máxima (daN)	Tração máxima (daN/mm <sup>2</sup> )
ACCC	4904	12,781

Como foi referido o valor adotado para a tração máxima será de 12 daN/mm<sup>2</sup>. Apesar de os valores máximo e utilizado serem muito próximos o valor utilizado é inferior, de forma que é aceitável a sua utilização.

#### 6.3.3.2. Força do vento

Com a equação (6.2) foi calculada a força do vento que os cabos experimentam nos estados de Primavera e Inverno.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.14.

**Tabela 6.14** - Valores da força do vento.

Estado	Força do vento (daN/m)
Primavera	1,272
Inverno	0,509

#### 6.3.3.3. Coeficientes de sobrecarga

Como, neste caso, não existe a ação do gelo o cálculo dos coeficientes de sobrecarga torna-se bastante mais simples. Os coeficientes de sobrecarga foram calculados usando a equação (6.3) e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.15.

**Tabela 6.15** - Coeficientes de sobrecarga.

Estado	Coeficientes de sobrecarga
Primavera	1,519
Inverno	1,099



#### 6.3.3.4. Vão Crítico

Através da aplicação da equação (6.4) calculou-se o vão crítico para este caso.

O resultado obtido para o vão crítico foi 374,27 m

#### 6.3.3.5. Estado mais desfavorável

Pela análise do diagrama da Figura 6.6, e tendo em conta os valores dos coeficientes de sobrecarga e do vão crítico determinou-se o estado mais desfavorável para este caso.

Seguindo o diagrama verificou-se que o estado mais desfavorável para este caso é a Primavera.

#### 6.3.3.6. Flechas

Finalmente é possível calcular as flechas do cabo nos diversos estados de temperatura para comparar com as medições efetuadas ao cabo em funcionamento. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 6.16.

**Tabela 6.16** - Resultado obtido e resultados das medições.

	Resultado obtido	Medição	
		Condutor médio	Condutor inferior
Flecha (m)	8,02	6,89	7,03

As medições efetuadas, fornecidas pela EDP, são referentes ao dia 6 de Fevereiro de 2013 numa altura em que a temperatura do cabo era de 15°C.

Observando os resultados obtidos facilmente se constata que os resultados obtidos através dos cálculos realizados mostram uma dimensão para a flecha dos condutores maior do que o que se verifica na realidade, não sendo a diferença de valores alarmante, rondando um metro de diferença. Este pessimismo do cálculo teórico relativamente aos valores reais, sem que haja uma diferença de valores muito exagerada, é bastante positiva visto que se os limites de segurança de uma linha forem estipulados tendo em conta um valor, para as flechas, maior que o que se verifica na realidade as margens de segurança serão maiores que o esperado e não se correrá o risco de incidentes.



# Capítulo 7

## Conclusão e Trabalhos Futuros

### 7.1 Conclusões

Esta dissertação pode dividir-se em três partes: a primeira consiste na descrição do cabo proveniente da informação recolhida. A segunda fase corresponde à descrição das vantagens e desvantagens, consequência das características anteriormente explanadas, e de que modo podem influenciar a escolha do condutor na construção de novas linhas ou no *up-rating* de uma linha existente. A terceira e última refere-se ao estudo do comportamento mecânico e térmico exibido pelo cabo.

Na primeira fase, correspondente ao Capítulo 2, foram explicadas as características dos materiais que constituem o cabo ACCC e a sua configuração. Ficou claro, logo de início, que o cabo ACCC é inovador relativamente aos condutores convencionais e também outros cabos de alta temperatura usados em linhas aéreas. O núcleo compósito, ao invés de um núcleo de metal, é algo que nunca havia sido usado anteriormente e que atribui ao cabo ACCC características únicas: a larga gama de temperaturas em que pode funcionar, as tensões mecânicas que suporta e o pequeno coeficiente de dilatação assumem valores que os cabos convencionais nunca conseguiram atingir.

A segunda fase, correspondente aos Capítulos 3 e 4. No Capítulo 3 foram explanadas as vantagens e desvantagens que o cabo ACCC apresenta e no Capítulo 4 o peso de ambas no momento da decisão sobre que cabo utilizar na construção de uma linha ou no *up-rating* de uma linha existente. Apesar de todas as inovações que apresenta, nem tudo são vantagens no que diz respeito à utilização do cabo ACCC. Desvantagens oriundas de technicalidades, de índole social e que advêm de terceiros, como os outros equipamentos que estão em série com o cabo, têm que ser tidas em conta na altura da escolha do cabo a utilizar numa linha aérea. Posto isto, não se pode concluir que o cabo ACCC elimina toda a concorrência e torna-se a escolha óbvia para qualquer obra, é mais uma alternativa a ter em conta aquando da escolha de um cabo a utilizar numa linha aérea, uma alternativa muito interessante.

Na terceira, e última, fase corresponde aos Capítulos 5 e 6, onde foram abordados os comportamentos mecânico e térmico do cabo, respetivamente. Quanto à componente mecânica verificou-se que, graças ao núcleo compósito, o cabo exhibe um comportamento bastante elástico e que após aguentar uma dada carga mecânica volta sempre à sua forma inicial, as deformações que o podem afetar resultam do alumínio. Quanto ao comportamento do cabo sob a ação do vento, o cabo ACCC tem uma capacidade de auto-amortecimento superior aos cabos convencionais, mas na resistência a falhas devido a fadiga dos materiais é melhor equipar o cabo com pinças de suspensão adequadas para garantir que daí não ocorrem problemas. Relativamente ao gelo, o principal problema verificado deve-se ao peso que a formação de gelo em condutores aéreos lhes inflige; esse peso extra, que o condutor terá que suportar, resulta num aumento da flecha provocada pelos condutores, que pode ser excessiva e violar os limites de segurança.

O aspeto mais importante abordado nos capítulos referentes ao comportamento do cabo diz respeito à questão do ponto de joelho, consequência da grande gama de temperaturas em que o cabo ACCC pode operar. O ponto de joelho é consequência de o alumínio deixar de contribuir fisicamente para o comportamento do cabo e limitar-se a fazer circular a corrente elétrica. O ponto de joelho divide o gráfico que traduz o aumento da dimensão da flecha do cabo, com o aumento da temperatura, em duas zonas. A primeira zona (pré ponto de joelho), em que o alumínio ainda contribui para o aumento da flecha, caracteriza-se por um aumento mais acentuado desta. Após o ponto de joelho o crescimento da flecha do cabo atenua, devido ao facto de só o núcleo compósito contribuir para tal. A temperatura a que o alumínio perde as propriedades mecânicas é, normalmente, a 100°C, mas é possível manipular o ponto de joelho através da tensão mecânica aplicada ao cabo e quanto mais cedo ocorrer, ou seja, a temperaturas mais baixas, mais benéfico é, pois a dimensão da flecha será menor.

Na comparação entre o cabo ACCC e o cabo convencional ACSR foi possível concluir que, mesmo no pior cenário possível para a ocorrência do ponto de joelho (100°C), as flechas criadas pelo cabo ACCC são sempre inferiores, fica provada esta vantagem face aos cabos convencionais.

Quando se compararam os resultados obtidos com os resultados fornecidos pelo fabricante observou-se uma diferença, entre um a dois metros, que pode causar uma certa preocupação, já que o valor calculado é inferior aquele que o fabricante afirma que ocorrerá. Isto pode levar a que as distâncias de segurança de uma linha fiquem subdimensionadas e ocorram incidentes devido à violação dos limites máximos para a dimensão da flecha. Esta diferença de valores resulta de dois fatores: a diferença de métodos utilizados no cálculo e o pouco conhecimento que ainda se tem sobre o comportamento do cabo ACCC em aplicações reais. Nesta altura ainda não é possível saber quais cálculos estão corretos, pois não existe o retorno de experiência da aplicação do cabo devido ao facto de que a sua utilização ainda é recente. Só através da monitorização da flecha do cabo, comparando os reais valores com os

valores calculados é possível saber qual traduz melhor o seu comportamento e permite que se projete uma linha corretamente dimensionada no que diz respeito às distâncias de segurança a obstáculos.

Já quando se comparam os resultados obtidos com valores medidos o que se verificou foi que a diferença entre ambos é pequena, cerca de um metro, sendo o valor mais pessimista o valor calculado, o que significa que a linha ficaria sobredimensionada em termos de distância aos obstáculos, ficando ainda mais garantido que não haverá problema de violações dos limites máximos. Obviamente que muito dificilmente valores calculados coincidem com valores reais a 100%, mas este facto vem reforçar a ideia de que é necessário acompanhar o funcionamento do cabo para adquirir conhecimento de como varia, realmente, a dimensão da flecha com a temperatura. Até se conhecer realmente bem o comportamento deste cabo a melhor abordagem ao efetuar os cálculos é tratar o cabo como se fosse um cabo convencional e ignorar o ponto de joelho, usando apenas os valores referentes ao comportamento do cabo abaixo do ponto de joelho. Esta abordagem irá dar resultados superiores aos que se verificarão na realidade, mas sendo a linha sobredimensionada não levantará problemas de segurança no que diz respeito à violação dos limites de segurança. Esta é a abordagem atualmente utilizada pela EDP.

Após o estudo efetuado neste trabalho sobre o cabo ACCC, é seguro afirmar que este cabo veio para ficar. Tem inúmeras potencialidades e ajuda a resolver muitos problemas cuja resolução, anteriormente, passava por operações mais dispendiosas e demoradas. Prova disso é a disseminação que se começa a verificar em todo o mundo, estando já instalado em mais de 25 países. Sempre que se pensar na construção de uma nova linha de transporte de energia ou intervir numa linha já existente deve ponderar-se a aplicação do cabo ACCC.

Consideram-se cumpridos os objetivos propostos para este trabalho, uma vez que foi possível conhecer mais profundamente o cabo ACCC, constituição, vantagens e desvantagens e comportamentos mecânico e térmico.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Devido à existência ainda recente dos cabos ACCC é possível realizar vários estudos sobre ele. Um possível estudo seria a monitorização “constante” do cabo, especialmente em temperaturas superiores a 100°C para ser possível averiguar a legitimidade dos resultados teóricos. No geral o estudo de como este cabo se comporta em funcionamento tem interesse, pois, como foi dito, não existe um retorno de experiência, que é importante, porque até ser possível registar o real comportamento do cabo tudo o que se possa dizer é teórico e necessita de validação.



# Referências

- [1] Avril, C. (1974). Construction des Lignes Aériennes a Haute Tension - Technique française d'études et de realization, Vol. 1. Éditions Eyrolles, Paris.
- [2] Avril, C. (1974). Construction des Lignes Aériennes a Haute Tension - Technique française d'études et de realization, Vol. 2. Éditions Eyrolles, Paris.
- [3] Kavanagh, T.; Armstrong, O.; , "An evaluation of High Temperature Low Sag conductors for uprating the 220kV transmission network in Ireland," Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International , pp.1-5, Aug. 31 2010-Sept. 3 2010.
- [4] Jones, W.D.; , "More heat, less sag [power cable upgrades]," Spectrum, IEEE , vol.43, no.6, pp.16-18, Junho 2006.
- [5] Alawar, A.; Bosze, E.J.; Nutt, S.R.; , "A composite core conductor for low sag at high temperatures," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.20, no.3, pp. 2193- 2199, Julho 2005.
- [6] Burks, B.; Armentrout, D.L.; Kumosa, M.; , "Failure prediction analysis of an ACCC conductor subjected to thermal and mechanical stresses," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.17, no.2, pp.588-596, Abril 2010.
- [7] Yun-Xia Zheng; Jian-Hua Zhang; Jing-Yan Yang; Hai-Feng Su; Yu-Jia Li; , "Research of new technologies to anti-icing disaster and anti-earthquake in transmission and distribution engineering," Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on, pp.1-6, 24-28 Outubro. 2010.
- [8] Martini, J.S.C.; Jardinetti, R.B.; Masuda, M.; Saiki, G.Y.; Kayano, P.S.D.;, "Upgrading of Transmission Lines in Areas of Severe Environmental Constraints," IEEE Latin America Transactions, vol.10, no.4, Junho 2012.
- [9] Kopsidas, K.; Rowland, S. M.;, "Evaluation of Potentially Effective Ways for Increasing Power Capacity of Existing Overhead Lines".
- [10] Kopsidas, K.; Rowland, S. M.;, "A Performance Analysis of Reconductoring an Overhead Line Structure," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.24, no.4, pp. 2248- 2256, Outubro 2009.
- [11] Mateescu, E.; Marginean, D.; Gheorghita, G.; Dragan, E.; Gal, St.I.A.; Matea, C.;, "Upgrading a 220kV Double Circuit Transmission Line in Romania; Study of the Possible

- Solutions, Technical and Economic Comparison,” IEEE Bucharest Power Tech Conference, Junho 28 - Julho 2 2009.
- [12] Rui Filipe Silva Mendes Cunha, “Análise da Solução “Condutores Especiais” no Incremento da Capacidade de Transporte das Linhas Aéreas de Muito Alta Tensão”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [13] Albizu, I.; Mazón, A.J.; Bedialauneta, M.; Sagastabeitia, K.;, “Overhead conductor monitoring system for the evaluation of low sag behavior”, 2010.
- [14] Alawar, A.A.; Bosze, E.J.; Nutt, S.R.;, “High Temperature Strength and Creep of an Al Conductor with a Hybrid Composite Core”, 16<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials, 2007.
- [15] Leenders, J.P.A.;, “Upgrading overhead lines with temperature, low sag conductors”, Tese, Faculteit Elektrotechniek van de Technische Universiteit Eindhoven, 2007.
- [16] Douglass, D.A.;, “Practical Application of High-Temperature Low-Sag (HTLS) Transmission Conductors”, Junho 2004.
- [17] Larruskain, D.M.; Zamora, I.; Abarrategui, O.; Iraolagoitia, A.; Gutiérrez, M.D.; Loroño, E.; Bodega, F. de la; , “Power transmission capacity upgrade of overhead lines”.
- [18] Dawson, D.;, “Composites connect with the world of cabling”, Composites World, Fevereiro 2006.
- [19] Gorur, R.; Mobasher, B.; Olsen, R.;, “Characterization of Composite Cores for High Temperature Low-Sag (HTLS) Conductors”, Final project report, Power systems engineering Research Center, Julho 2009.
- [20] Catchpole, P.;, “Development of Stress-Strain Polynomials and Creep Parameters for ACCC/TW Conductors”, Power engineers Inc., February 2007.
- [21] Kopsidas, K.; Rowland, S. M.;, “Evaluating opportunities for increasing power capacity of existing overhead line systems”, IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, Vol. 5, Iss. 1, pp. 1-10, 2010.
- [22] “Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC Conductors”, CTC Global, 2011.
- [23] “Fundamentos e Aplicações do Alumínio”, ABAL-Associação Brasileira do Alumínio.
- [24] “ACCC Conductor Installation Guidelines”, CTC Cable Corporation.
- [25] “Optimising Energy Efficiency Bare Overhead Lines”, presented by Dominic Majendie, Tunis, Tunisia, Dezembro 15, 2009.
- [26] “Innovate conductor solutions for power transmission and distribution systems”, CTC Cable Corporation, 2005.
- [27] Burks, B.; Armentrout, D.; Kumosa, M.;, “Analysis of Drake Sized ACCC Core Subjected to Bending”, IEEE TP&C, Julho 29 2009.
- [28] “Optimizando la Eficiencia de la Energía en Líneas Aéreas Expuestas”, CTC Cable Corporation, Santiago, Setembro 2009.



- [29] “Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão”, Edição DGE, Abril 1993.
- [30] Yun-I Tsai, “Environmental effects on the hybrid glass fiber/carbon fiber composites”, Dissertação de Doutorado, Faculty of the Graduate School University of Southern California, Dezembro 2009.
- [31] “Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations”, U.S.-Canada Power System Outage task force, Abril 2004.
- [32] Lancaster, M. A.; “Experimental Conductor Modeling”, Maio 2010.
- [33] “Aeolian Vibration Basics”, Preformed Line Products, Janeiro 2011.
- [34] Alexandre Sá dos Santos, “Estudo de Vibrações eólicas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica de Alta Tensão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2008.



## Anexos

### Anexo 1: Características dos cabos

#### A1.1. Cabo ACSR - Alfena

Tabela A.1 - Características cabo ACSR utilizado.

<i>Equival. copper área (mm<sup>2</sup>)</i>	161,30
<i>Diameter over steel (mm)</i>	10,05
<i>Overall diameter (mm)</i>	23,47
<i>Aluminium area (mm<sup>2</sup>)</i>	264
<i>Steel area (mm<sup>2</sup>)</i>	61,70
<i>Total area (mm<sup>2</sup>)</i>	326,58
<i>Mass (kg/km):</i>	
<i>Aluminium</i>	733
<i>Steel</i>	488
<i>Total</i>	1219
<i>Ultimate tensile strength (N)</i>	112700
<i>Coefficient of linear expansion (°C<sup>-1</sup>)</i>	0,0000177
<i>Modulos of elasticity (MPa)</i>	78500
<i>DC resistance at 20°C/km</i>	0,1093

## A1.2. Cabo ACCC - Alfena

Tabela A.2 - Características cabo ACCC utilizado em Alfena.

DATA SHEET:		ACCC®-Dove		CTC GLOBAL	
For questions, please contact CTC Application Engineering Department: applicationsupport@ctccable.com					
Governing Units: Imperial					
Mechanical Specifications		Metric		Imperial	
Nominal Aluminum Cross-sectional Area*	361.6	mm <sup>2</sup>	713.5	kcmil	
Nominal Diameter of Composite Core (CTC Part Number 200-005)	7.75	mm	0.305	in.	
Nominal Cross-sectional Area of Core	47.1	mm <sup>2</sup>	0.073	in <sup>2</sup>	
Overall Diameter of Conductor	23.55	mm	0.927	in.	
Nominal Cross-sectional Area of the Conductor	408.6	mm <sup>2</sup>	0.633	in <sup>2</sup>	
Ultimate Tensile Strength of Conductor <sup>1,2</sup>	122.3	kN	27.5	kips	
Rated Strength of Core - 313 ksi (2158 MPa)	101.7	kN	22.9	kips	
Core Nominal Mass per unit length	86	kg/km	58	lb/kft	
Conductor Nominal Mass per unit length	1083	kg/km	727.7	lb/kft	
Aluminum Nominal Mass per unit length**	996.5	kg/km	669.7	lb/kft	
Maximum Allowable Operating Temperature at Surface <sup>4</sup>	180	°C	356	°F	
Coefficient of Linear Expansion Above Thermal Kneepoint	1.61E-06	/°C	8.94E-07	/°F	
Coefficient of Linear Expansion Below Thermal Kneepoint	1.85E-05	/°C	1.03E-05	/°F	
Final Modulus of Elasticity Above Thermal Kneepoint	112.3	GPa	16.3	Msi	
Final Modulus of Elasticity Below Thermal Kneepoint	60.9	GPa	8.8	Msi	
Electrical Specifications		Metric		Imperial	
Nominal Resistivity of Aluminum at 20°C, DC 63% IACS	0.0771	ohm/km	0.1240	ohm/mile	
Temperature Coefficient of Resistance	0.00404		0.00404		
Frequency	60	Hz	60	Hz	
AC Nominal Resistance at 25°C	0.0792	ohm/km	0.1274	ohm/mile	
AC Nominal Resistance at 75°C	0.0947	ohm/km	0.1524	ohm/mile	
AC Nominal Resistance at 180°C	0.1273	ohm/km	0.2049	ohm/mile	
AC Current Rating at Given Temperature <sup>3</sup>		902	@ 100C & 60 Hz		
		1346	@ 180C & 60 Hz		
GMR (estimated)	0.010	m	0.031	ft	
Inductive Reactance	0.261	ohm/km	0.420	ohm/mile	
Capacitive Reactance	0.155	Mohm-km	0.097	Mohm-mile	

\*ACCC® conductor is produced with 1350 O-tempered aluminum. The nominal H-19 Aluminum equivalent area is 372.2 sq. mm (734.5 kcmil)

\*\*ACCC® Conductors are required to exhibit lay lengths (ratios) that conform to ASTM B 857 or EN 50540.

1) Based on 96% of the annealed aluminum minimum tensile strength given in ASTM B 609 and EN 50540.

2) Strength at ambient temperature

3) Conditions: 2 ft/s (0.61 m/s) wind, 0 ft (0 m) Elevation, 0.5 Emis, 0.5 absorp, 40°C Ambient temperature, 96 W/sq. ft (1033 W/sq. m) sun radiation

4) Maximum continuous operating temperature of ACCC® is 180°C and a maximum emergency temperature of 200°C (10,000 hours over the life of the conductor).

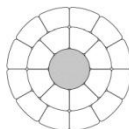
The information contained herein is offered in good faith. The actual configuration of a given size may vary between conductor manufacturers and may result in slight variations in some of the indicated values.

## A1.3. Cabo ACCC - Figueira da Foz

Tabela A.3 - Características cabo ACCC utilizado na Figueira da Foz.

data sheet

ACCC Amsterdam



LAMIFIL



Version 3, 08-12-2010

Conductor		LF ACCC 380mm <sup>2</sup>			
Code name		ACCC Amsterdam			
Mechanical specifications		Metric (SI)		Imperial	
Nominal aluminium equivalent area	mm <sup>2</sup>	383,7		in <sup>2</sup>	0,595
Nominal cross sectional area of aluminium	mm <sup>2</sup>	371,3		in <sup>2</sup>	0,576
Nominal cross-sectional area of core	mm <sup>2</sup>	47,1		in <sup>2</sup>	0,073
Number, diameter and type of central wire	#, mm	1 7,75 R CC		#, in	1 0,305 R CC
Number, (eq.) diameter and type of wire in layer	#, mm	8 4,86 T Al		#, in	8 0,191 T Al
Number, (eq.) diameter and type of wire in layer	#, mm	12 4,87 T Al		#, in	12 0,192 T Al
Diameter tolerance of Composite Core (CC)	mm	± 0,05		in	± 0,002
Diameter tolerance of aluminium wires (Al or Alloy)	mm	± 0,03		in	± 0,001
Minimum filling factor of the aluminium cross section	%	93		%	93
Lay ratio of inner layer(s)		10-16			10-16
Lay ratio of outer layer		10-14			10-14
Overall diameter	mm	23,55		in	0,927
Diameter of core	mm	7,75		in	0,305
Rated tensile strength of conductor (RTS as per ASTM B 857) *	kN	122,6		klbf	27,6
Extreme load safety strength of conductor (with 40% of the aluminium strength) **	kN	110,4		klbf	24,8
Rated tensile strength of core	kN	101,7		klbf	22,9
Nominal mass per unit length - total	kg/km	1112,5		lb/kft	747,6
Nominal mass per unit length - aluminium	kg/km	1026,1		lb/kft	689,5
Nominal mass per unit length - core	kg/km	86		lb/kft	58
Coefficient of linear expansion above thermal kneepoint	/ K	0,0000161		/ °F	0,0000089
Coefficient of linear expansion below thermal kneepoint	/ K	0,0000187		/ °F	0,00001039
Modulus of elasticity of the core	GPa	112,3		Msi	16,29
Modulus of elasticity below thermal kneepoint	GPa	62,9		Msi	9,12
Geometric mean radius	mm	9,57		ft	0,0314
Electrical specifications		Metric (SI)		Imperial	
Nominal DC resistance at 20 °C (nominal)	Ohm/km	0,0754		Ohm/mile	0,1213
Temperature coefficient		0,00403			0,00403
Frequency	Hz	50		Hz	60
Nominal AC resistance at 20 °C (tolerance ± 2%)	Ohm/km	0,0760		Ohm/mile	0,1228
Nominal AC resistance at 25 °C (tolerance ± 2%)	Ohm/km	0,0775		Ohm/mile	0,1252
Nominal AC resistance at 50 °C (tolerance ± 2%)	Ohm/km	0,0851		Ohm/mile	0,1373
Nominal AC resistance at 75 °C (tolerance ± 2%)	Ohm/km	0,0926		Ohm/mile	0,1494
Nominal AC resistance at 100 °C (tolerance ± 2%)	Ohm/km	0,1002		Ohm/mile	0,1616
Nominal AC resistance at 125 °C (tolerance ± 2%)	Ohm/km	0,1077		Ohm/mile	0,1737
Nominal AC resistance at 150 °C (tolerance ± 2%)	Ohm/km	0,1153		Ohm/mile	0,1859
Nominal AC resistance at 175 °C (tolerance ± 2%)	Ohm/km	0,1229		Ohm/mile	0,1980
Nominal AC resistance at 200 °C (tolerance ± 2%)	Ohm/km	0,1305		Ohm/mile	0,2102
Maximum allowable continuous operating temperature (surface)	°C	175		°F	347
Maximum allowable continuous operating temperature (core)	°C	180		°F	356
Emergency operating temperature (core)	°C	200		°F	392
Inductive reactance: X <sub>a</sub> (conductor part)	Ohm/km	0,2175		Ohm/mile	0,4199
Shunt capacitive reactance: X <sub>a</sub> (conductor part)	MOhmkm	0,1863		MOhm/mile	0,0965
Individual wires		Metric (SI)		Imperial	
Maximum resistivity of aluminium at 20 °C, minimum IACS	nOhmm, %	27,35 63%		nOhmft, %	89,73 63%
Minimum tensile strength, aluminium wire	MPa	58,6		psi	8500

Standard applied for conductor manufacturer: EN50182

\* Note ASTM calculates aluminium strength at 96% of the minimum Tensile Strength of the aluminium wire

\*\* This safety strength is recommended where sustained loads of over 80% of the RTS are expected for prolonged periods.

## Anexo 2: Resultados do fabricante

### A2.1. Cabo ACSR - Alfena

Tabela A.4 - Resultados fornecidos pelo fabricante para o cabo ACSR.

Vão	287 m		171 m		181 m		21 m	
$\Theta_i$ (°C)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)
-20	1224	10,17	1396	3,14	1369	3,59	344	0,20
-10	1197	10,40	1310	3,35	1293	3,80	275	0,25
0	1172	10,63	1235	3,55	1226	4,01	233	0,30
10	1149	10,85	1169	3,75	1167	4,22	205	0,34
15	1138	10,96	1140	3,85	1140	4,32	194	0,36
20	1127	11,08	1111	3,95	1114	4,42	184	0,38
25	1116	11,18	1085	4,05	1090	4,52	177	0,39
30	1106	11,29	1061	4,14	1068	4,61	172	0,41
40	1086	11,50	1015	4,33	1025	4,80	163	0,43
50	1067	11,72	974	4,51	988	4,99	155	0,45
60	1049	11,92	938	4,69	953	5,17	148	0,47
70	1032	12,13	905	4,86	922	5,35	142	0,49
80	1015	12,33	881	5,00	898	5,50	137	0,51

## A2.2. Cabo ACCC - Alfena

Tabela A.5 - Resultados fornecidos pelo fabricante para o cabo ACCC.

Vão	287 m		171 m		181 m		21 m	
$\Theta_i$ (°C)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)
-20	1134	9,75	1297	3,00	1276	3,42	241	0,26
-10	1111	9,95	1230	3,17	1215	3,59	199	0,31
0	1089	10,16	1169	3,33	1160	3,77	172	0,36
10	1069	10,36	1113	3,50	1109	3,94	152	0,41
15	1059	10,46	1087	3,59	1085	4,03	147	0,42
20	1049	10,56	1062	3,67	1063	4,11	142	0,44
25	1039	10,66	1039	3,75	1041	4,2	138	0,45
30	1030	10,76	1016	3,84	1020	4,29	134	0,46
40	1012	10,95	975	4,00	982	4,46	131	0,47
50	995	11,15	938	4,17	947	4,62	130	0,48
60	979	11,34	903	4,32	915	4,78	130	0,48
70	964	11,52	873	4,48	886	4,94	129	0,48
80	949	11,71	845	4,63	860	5,10	128	0,48
90	935	11,88	819	4,77	836	5,25	127	0,49
100	922	12,02	800	4,89	814	5,39	127	0,49
110	911	12,21	797	4,91	812	5,40	126	0,49
120	910	12,23	795	4,92	810	5,42	125	0,49
130	909	12,24	793	4,93	808	5,43	125	0,50
140	907	12,26	791	4,95	806	5,44	124	0,50
150	906	12,28	789	4,96	804	5,46	124	0,50
160	905	12,30	787	4,97	802	5,47	123	0,50
170	904	12,31	785	4,99	800	5,48	122	0,51
175	903	12,32	784	4,99	799	5,49	122	0,51
180	902	12,33	783	5,00	798	5,50	122	0,51
190	901	12,35	781	5,01	796	5,51	121	0,51
200	900	12,36	779	5,03	794	5,52	120	0,52

## Anexo 3: Resultados EDP

### A3.1. Cabo ACSR - Alfena

Tabela A.6 - Resultados fornecidos pela EDP para o cabo ACSR.

Vão	287 m		171 m		181 m		21 m	
$\Theta_i$ (°C)	$t_{\theta i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\theta i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\theta i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\theta i}$ (daN)	Flecha (m)
-10	1226	10,25	1424	3,13	1390	3,59	590	0,17
-5	1212	10,37	1372	3,25	1345	3,71	476	0,22
0	1197	10,5	1325	3,36	1304	3,83	396	0,26
5	1184	10,62	1281	3,48	1265	3,95	339	0,3
10	1170	10,74	1241	3,59	1229	4,06	298	0,34
15	1157	10,86	1203	3,70	1196	4,17	268	0,38
20	1145	10,98	1169	3,81	1165	4,28	245	0,42
25	1133	11,10	1137	3,92	1136	4,39	227	0,45
30	1121	11,21	1107	4,03	1109	4,5	211	0,48
35	1110	11,33	1079	4,13	1083	4,61	199	0,52
40	1098	11,45	1053	4,23	1059	4,71	188	0,54
45	1088	11,56	1028	4,33	1037	4,82	179	0,57
50	1077	11,67	1005	4,43	1015	4,92	171	0,6
55	1067	11,79	983	4,53	995	5,02	164	0,62
60	1057	11,90	963	4,63	976	5,12	158	0,65
65	1047	12,01	943	4,72	958	5,21	152	0,67
70	1038	12,12	925	4,82	941	5,31	147	0,7
75	1029	12,23	908	4,91	924	5,40	143	0,72
80	1020	12,33	891	5,00	909	5,50	138	0,74



## Anexo 4: Resultados obtidos

### A4.1. Cabo ACSR - Alfena

Tabela A.7 - Resultados obtidos para o cabo ACSR.

Vão	287 m		171 m		181 m		21 m	
$\Theta_i$ (°C)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)
-10	1228,37	10,22	1426,35	3,12	1392,13	3,59	591,11	0,12
-5	1213,60	10,34	1374,57	3,24	1347,20	3,71	477,13	0,15
0	1199,33	10,47	1326,99	3,36	1305,63	3,82	396,18	0,18
5	1185,51	10,59	1283,18	3,47	1267,10	3,94	339,47	0,21
10	1172,14	10,71	1242,74	3,59	1231,30	4,05	298,78	0,24
15	1159,18	10,83	1205,32	3,70	1197,96	4,17	268,53	0,26
20	1146,62	10,95	1170,63	3,81	1166,86	4,28	245,24	0,29
25	1134,44	11,06	1138,38	3,91	1137,77	4,39	226,73	0,31
30	1122,62	11,18	1108,33	4,02	1110,51	4,50	211,65	0,33
35	1111,14	11,30	1080,27	4,12	1084,92	4,60	199,09	0,36
40	1100,00	11,41	1054,01	4,23	1060,84	4,71	188,44	0,38
45	1089,16	11,52	1029,39	4,33	1038,15	4,81	179,28	0,39
50	1078,63	11,64	1006,25	4,43	1016,73	4,91	171,30	0,41
55	1068,38	11,75	984,47	4,53	996,47	5,01	164,26	0,43
60	1058,40	11,86	963,92	4,62	977,28	5,11	158,01	0,45
65	1048,69	11,97	944,51	4,72	959,07	5,20	152,41	0,46
70	1039,23	12,08	926,13	4,81	941,77	5,30	147,35	0,48
75	1030,01	12,19	908,71	4,90	925,31	5,39	142,75	0,50
80	1021,03	12,29	892,17	4,99	909,63	5,49	138,55	0,51

## A4.2. Cabo ACCC - Alfena

Tabela A.8 - Resultados obtidos para o cabo ACCC, considerando o ponto de joelho a 100°C.

Ponto de flecha a 100°C								
Vão	287 m		171 m		181 m		21 m	
$\Theta_i$ (°C)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)
-10	1567,51	7,12	2025,20	1,96	1953,00	2,27	-	-
-5	1531,53	7,29	1902,41	2,08	1845,68	2,41	603,74	0,10
0	1497,57	7,45	1802,62	2,20	1748,20	2,54	472,18	0,13
5	1465,48	7,62	1703,60	2,33	1667,51	2,66	380,05	0,17
10	1435,12	7,78	1613,82	2,46	1580,05	2,81	317,95	0,20
15	1406,35	7,94	1532,55	2,59	1513,70	2,93	275,22	0,23
20	1379,05	8,09	1459,05	2,72	1447,22	3,07	244,52	0,26
25	1353,11	8,25	1392,54	2,85	1386,78	3,20	221,49	0,28
30	1328,44	8,40	1332,29	2,97	1331,73	3,33	203,56	0,31
35	1304,94	8,55	1277,60	3,10	1281,49	3,46	189,17	0,33
40	1282,52	8,70	1227,86	3,23	1235,52	3,59	177,33	0,36
45	1261,13	8,85	1182,49	3,35	1193,36	3,72	167,39	0,38
50	1240,68	9,00	1140,99	3,47	1154,59	3,84	158,90	0,40
55	1221,11	9,14	1102,93	3,59	1118,84	3,97	151,55	0,42
60	1202,37	9,28	1067,92	3,71	1085,78	4,09	145,11	0,43
65	1184,40	9,42	1035,63	3,83	1055,13	4,21	139,40	0,45
70	1167,16	9,56	1005,75	3,94	1026,65	4,32	134,31	0,47
75	1150,60	9,70	978,03	4,05	1000,11	4,44	129,73	0,49
80	1134,67	9,84	952,25	4,16	975,32	4,55	125,58	0,50
85	1119,35	9,97	928,21	4,27	952,12	4,66	121,80	0,52
90	1104,59	10,10	905,74	4,37	930,36	4,77	118,34	0,53
100	1076,65	10,37	864,92	4,58	890,63	4,98	112,20	0,56
110	1074,25	10,39	861,47	4,60	887,26	5,00	111,71	0,56
120	1071,86	10,41	858,07	4,62	883,93	5,02	111,22	0,57
130	1069,49	10,44	854,70	4,64	880,64	5,04	110,74	0,57
140	1067,14	10,46	851,36	4,65	877,38	5,06	110,27	0,57
150	1064,80	10,48	848,07	4,67	874,16	5,08	109,80	0,57
160	1062,47	10,50	844,81	4,69	870,97	5,10	109,34	0,58
170	1060,16	10,53	841,58	4,71	867,81	5,12	108,88	0,58
175	1059,01	10,54	839,98	4,72	866,24	5,12	108,65	0,58
180	1057,86	10,55	838,39	4,73	864,69	5,13	108,43	0,58
190	1055,58	10,57	835,24	4,74	861,59	5,15	107,98	0,58
200	1053,31	10,60	832,12	4,76	858,53	5,17	107,54	0,59

Tabela A.9 - Resultados obtidos para o cabo ACCC, considerando o ponto de joelho a 90°C.

Ponto de flecha a 90°C								
Vão	287 m		171 m		181 m		21 m	
$\Theta_i$ (°C)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)
-10	1567,51	7,12	2025,20	1,96	1953,00	2,27	-	-
-5	1531,53	7,29	1902,41	2,08	1845,68	2,41	603,74	0,10
0	1497,57	7,45	1802,62	2,20	1748,20	2,54	472,18	0,13
5	1465,48	7,62	1703,60	2,33	1667,51	2,66	380,05	0,17
10	1435,12	7,78	1613,82	2,46	1580,05	2,81	317,95	0,20
15	1406,35	7,94	1532,55	2,59	1513,70	2,93	275,22	0,23
20	1379,05	8,09	1459,05	2,72	1447,22	3,07	244,52	0,26
25	1353,11	8,25	1392,54	2,85	1386,78	3,20	221,49	0,28
30	1328,44	8,40	1332,29	2,97	1331,73	3,33	203,56	0,31
35	1304,94	8,55	1277,60	3,10	1281,49	3,46	189,17	0,33
40	1282,52	8,70	1227,86	3,23	1235,52	3,59	177,33	0,36
45	1261,13	8,85	1182,49	3,35	1193,36	3,72	167,39	0,38
50	1240,68	9,00	1140,99	3,47	1154,59	3,84	158,90	0,40
55	1221,11	9,14	1102,93	3,59	1118,84	3,97	151,55	0,42
60	1202,37	9,28	1067,92	3,71	1085,78	4,09	145,11	0,43
65	1184,40	9,42	1035,63	3,83	1055,13	4,21	139,40	0,45
70	1167,16	9,56	1005,75	3,94	1026,65	4,32	134,31	0,47
75	1150,60	9,70	978,03	4,05	1000,11	4,44	129,73	0,49
80	1134,67	9,84	952,25	4,16	975,32	4,55	125,58	0,50
85	1119,35	9,97	928,21	4,27	952,12	4,66	121,80	0,52
90	1104,59	10,10	905,74	4,37	930,36	4,77	118,34	0,53
100	1102,01	10,13	901,81	4,39	926,55	4,79	117,76	0,53
110	1099,44	10,15	897,93	4,41	922,78	4,81	117,19	0,54
120	1096,88	10,18	894,09	4,43	919,06	4,83	116,63	0,54
130	1094,35	10,20	890,30	4,45	915,38	4,85	116,07	0,54
140	1091,83	10,22	886,56	4,47	911,74	4,87	115,53	0,55
150	1089,33	10,25	882,86	4,49	908,15	4,89	114,99	0,55
160	1086,85	10,27	879,21	4,51	904,59	4,91	114,46	0,55
170	1084,38	10,29	875,59	4,53	901,07	4,93	113,94	0,55
175	1083,15	10,30	873,80	4,53	899,33	4,94	113,68	0,55
180	1081,92	10,32	872,02	4,54	897,59	4,95	113,42	0,56
190	1079,49	10,34	868,49	4,56	894,15	4,96	112,91	0,56
200	1077,07	10,36	865,01	4,58	890,75	4,98	112,41	0,56

Tabela A.10 - Resultados obtidos para o cabo ACCC, considerando o ponto de joelho a 80°C.

Ponto de flecha a 80°C								
Vão	287 m		171 m		181 m		21 m	
$\Theta_i$ (°C)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)
-10	1567,51	7,12	2025,20	1,96	1953,00	2,27	-	-
-5	1531,53	7,29	1902,41	2,08	1845,68	2,41	603,74	0,10
0	1497,57	7,45	1802,62	2,20	1748,20	2,54	472,18	0,13
5	1465,48	7,62	1703,60	2,33	1667,51	2,66	380,05	0,17
10	1435,12	7,78	1613,82	2,46	1580,05	2,81	317,95	0,20
15	1406,35	7,94	1532,55	2,59	1513,70	2,93	275,22	0,23
20	1379,05	8,09	1459,05	2,72	1447,22	3,07	244,52	0,26
25	1353,11	8,25	1392,54	2,85	1386,78	3,20	221,49	0,28
30	1328,44	8,40	1332,29	2,97	1331,73	3,33	203,56	0,31
35	1304,94	8,55	1277,60	3,10	1281,49	3,46	189,17	0,33
40	1282,52	8,70	1227,86	3,23	1235,52	3,59	177,33	0,36
45	1261,13	8,85	1182,49	3,35	1193,36	3,72	167,39	0,38
50	1240,68	9,00	1140,99	3,47	1154,59	3,84	158,90	0,40
55	1221,11	9,14	1102,93	3,59	1118,84	3,97	151,55	0,42
60	1202,37	9,28	1067,92	3,71	1085,78	4,09	145,11	0,43
65	1184,40	9,42	1035,63	3,83	1055,13	4,21	139,40	0,45
70	1167,16	9,56	1005,75	3,94	1026,65	4,32	134,31	0,47
75	1150,60	9,70	978,03	4,05	1000,11	4,44	129,73	0,49
80	1134,67	9,84	952,25	4,16	975,32	4,55	125,58	0,50
85	1133,27	9,85	949,98	4,17	973,14	4,56	125,23	0,50
90	1131,88	9,86	947,72	4,18	970,97	4,57	124,89	0,50
100	1129,10	9,88	943,26	4,20	966,67	4,59	124,21	0,51
110	1126,34	9,91	938,85	4,22	962,43	4,61	123,55	0,51
120	1123,61	9,93	934,50	4,24	958,24	4,63	122,89	0,51
130	1120,89	9,96	930,21	4,26	954,09	4,65	122,25	0,52
140	1118,19	9,98	925,97	4,28	950,00	4,67	121,61	0,52
150	1115,51	10,01	921,79	4,30	945,96	4,69	120,98	0,52
160	1112,85	10,03	917,66	4,32	941,97	4,71	120,37	0,52
170	1110,21	10,05	913,58	4,34	938,02	4,73	119,76	0,53
175	1108,89	10,07	911,56	4,35	936,07	4,74	119,46	0,53
180	1107,58	10,08	909,55	4,36	934,12	4,75	119,16	0,53
190	1104,98	10,10	905,58	4,38	930,27	4,77	118,57	0,53
200	1102,39	10,12	901,65	4,39	926,46	4,79	117,99	0,53

## A4.2. Cabo ACCC - Figueira da Foz

Tabela A.11 - Resultados obtidos para o cabo ACCC.

Vão	460 m	
$\Theta_i$ (°C)	$t_{\Theta_i}$ (daN)	Flecha (m)
-10	4679,77	6,15
-5	4529,34	6,35
0	4384,10	6,56
5	4244,14	6,78
10	4109,56	7,00
15	3980,40	7,23
20	3856,66	7,46
25	3738,33	7,70
30	3625,33	7,94
35	3517,58	8,18
40	3414,94	8,42
45	3317,29	8,67
50	3224,43	8,92
55	3136,20	9,17
60	3052,41	9,42
65	2972,83	9,68
70	2897,29	9,93
75	2825,55	10,18
80	2757,43	10,43
85	2692,72	10,68
90	2631,23	10,93
100	2517,16	11,43
110	2506,64	11,48
120	2496,23	11,52
130	2485,92	11,57
140	2475,73	11,62
150	2465,65	11,67
160	2455,67	11,71
170	2445,79	11,76
175	2440,89	11,79
180	2436,02	11,81
190	2426,35	11,86
200	2416,78	11,90